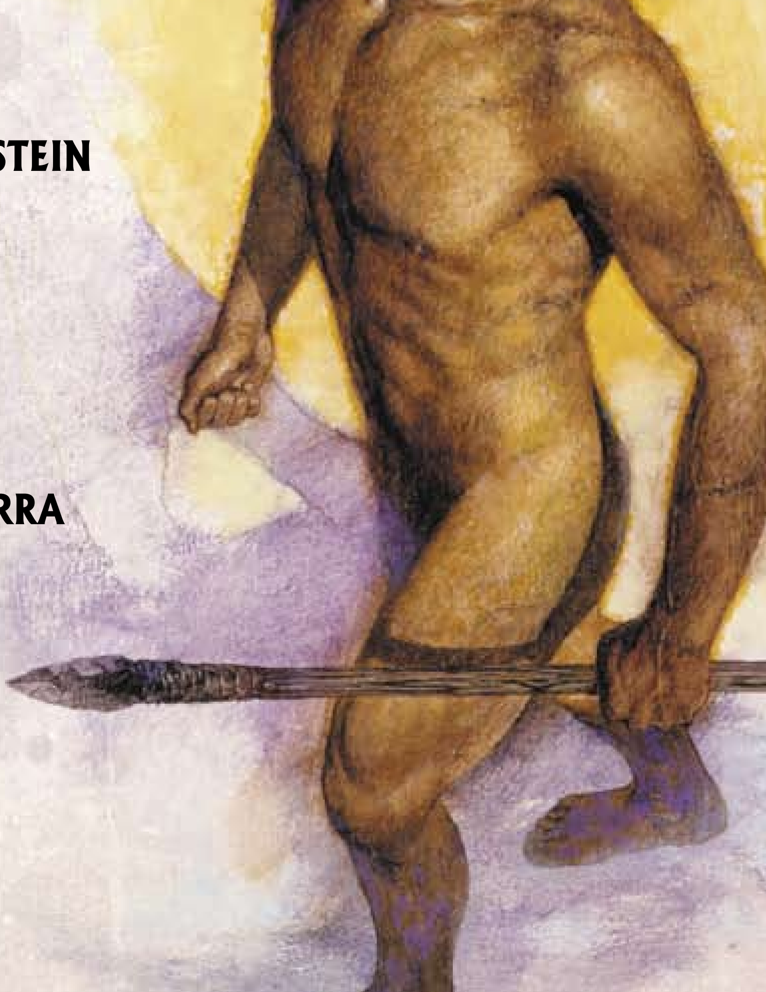
HELICOBACTER PYLORI • FIJACION DE LA MEMORIA

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL HOMBRE DE FLORES



CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN Y MICROCHIPS

NUEVOS BUSCADORES EN LA RED

TRILOBITES

LA BURBUJA LOCAL Y LA TIERRA

VIDA Y MUERTE DEL ACUEDUCTO DE NÎMES





Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Abril de 2005
Número 343



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

PRENSA CIENTIFICA, S. A.
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *Helicobacter pylori*; Ramón Pascual: *Condensados de Bose-Einstein y microchips* y *Cuando se rompe la simetría*; Carlos Lorenzo: *El hombre de Flores*; Luis Bou: *Vida y muerte del acueducto de Nîmes* y *Nuevos buscadores en la Red*; Felipe Cortés: *Fijación de la memoria*; Isabel Rábano: *Trilobites*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes*, *Ideas aplicadas* y *Curiosidades de la física*



Portada: Kazuhiko Sano

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

REPLICACIÓN VÍRICA. «Aflora una nueva visión acerca de la naturaleza de los virus. Solían considerarse sólo unos intrusos, extraños que invadían y parasitaban las células; pero hallazgos recientes, entre ellos el descubrimiento de modificaciones en los virus inducidas por el huésped, recalcan aún más su similitud con unidades hereditarias como los genes. De hecho, ciertos virus se consideran elementos básicos de la herencia en busca de un cromosoma. —Salvador E. Luria» [*Nota de la redacción: En 1969, Luria compartió el premio Nobel de Fisiología o Medicina por sus trabajos sobre la estructura génica de los virus.*]

VACUNA ANTIPOLIO. «Pronto conoceremos los resultados del ensayo de campo extensivo sobre la vacuna contra la poliomielitis realizado el año pasado. Cualesquiera que sean las conclusiones, la discusión entre los virólogos está servida, pues no se está sometiendo a prueba sólo una vacuna concreta sino también un principio inmunológico. La vacuna en cuestión se basa en un virus 'muerto', es decir, un virus tratado con formaldehído para tornarlo no infeccioso. Según numerosos virólogos, semejante vacuna jamás igualará en eficacia a una que contenga virus vivos. En mi opinión, sin embargo, una vacuna de virus muertos no sólo evita los riesgos asociados a los virus vivos sino que, correctamente preparada y administrada, puede resultar igual de efectiva en cuanto a la inmunidad. —Jonas E. Salk»

RASGOS CULTURALES. «Desgraciadamente, gran parte de los más importantes patrones de conducta propios de cada cultura resultan esquivos: son intangibles y nadie se ha ocupado nunca de describirlos. En aras de la comprensión intercultural, algunos organismos oficiales de EE.UU. han contratado en varias ocasiones a antropólogos para asesorar sus equipos técnicos. En Iberoamérica, por ejemplo, donde el contacto físico es más corriente y la unidad básica de espacio vital parece ser menor, los estadounidenses se sienten incómodos por la cercanía en que los iberoamericanos se colocan cuando conversan. Estos últimos, por su parte, se quejan de que los estadounidenses se muestran distantes y fríos —o, en sus propias palabras, *retraídos* (encerrados en sí mismos y poco comunicativos) [*véase la ilustración*].»



Percepción cultural bajo escrutinio de antropólogos, 1955.

...cien años

LOS TRABAJOS DE RAMSAY. «Hace algún tiempo Sir William Ramsay comunicó a la Regia Sociedad de Londres sus estimaciones de la concentración de criptón y xenón en la atmósfera; ahora dispone ya de la misma información para el neón y el helio. Tras una serie de delicadas investigaciones, ha llegado a la conclusión de que el aire contiene 86 partes en peso de neón por cada mil millones y 56 partes en peso, y 400 en volumen, de helio por cada diez mil millones. Tan minúsculas cantidades parecen rebasar el límite de detección; sin embargo, pruebas adicionales indican que se trata de estimaciones bastante exactas.»

...ciento cincuenta años

CARIES PREMATURA. «No existe razón alguna que explique por qué los estadounidenses son tan propensos a la caries precoz, en comparación con los ciudadanos de otros países. En EE.UU. hay trabajo para cinco veces más dentistas que en Gran Bretaña; mientras que en Gran Bretaña una mala dentadura es la excepción, en EE.UU. es la regla. Si bien los estadounidenses se molestan mucho más en lavarse los dientes que los nativos de Irlanda, los irlandeses muestran una dentadura más sana. Sabemos con certeza que el ácido acético no es la causa de esa caries dental precoz. Si durante la infancia se comieran más bollos de pan tosco —para ejercitar los dientes—, quizá se lograría reducir la prevalencia de la caries prematura en EE.UU.»

GUANO. «Han pasado quince años desde que el guano se usó por primera vez en Europa; se empezó sólo con unas pocas toneladas, a modo de experimentación. Desde entonces, el consumo de este abono ha crecido hasta casi 100.000 toneladas anuales. El año pasado, la demanda en EE.UU. fue tan elevada, que no pudo satisfacerse. Debido a tan creciente e insaciable demanda, el guano se ha visto sometido a las más escandalosas adulteraciones con mantillo de su mismo color. Por consiguiente, conviene a los agricultores servirse sólo de comerciantes respetables y acreditados. De entre todas las variedades de este fertilizante, la peruana es la que ofrece mejor calidad.»

ESTADISTICA

Escritores fractales

La ley de Zipf liga la frecuencia con que una palabra aparece en un texto con el número que le corresponde en la lista ordenada de las palabras más usadas en él; en concreto, ese número es inversamente proporcional a aquella frecuencia. Las leyes estadísticas con la forma de la inversa de una potencia establecen frecuencias relativas que no dependen de la escala. Es la característica propia de la fractalidad. Relaciones de este tipo son muy habituales en multitud de fenómenos. Dos brasileños las han encontrado también en la literatura. Al examinar los cuentos de Virginia Woolf, D. H. Lawrence, James Joyce y Katherine Mansfield, han dado con una variante literaria de la ley de Zipf: el número total de palabras de un relato es inversamente proporcional a una potencia de la razón entre el número de palabras distintas con que está escrito y el propio número total de palabras. Pero la conclusión más interesante de este trabajo es que el valor concreto de esa potencia y de la constante de proporcionalidad sirven para identificar a cada escritor.

SALUD PUBLICA

Crustáceos contra el dengue

Los mosquitos portadores del dengue causan al año más de 50 millones de infecciones en todo el mundo y al menos 12.000 muertes. Para atacar directamente a esos hematófagos, se ha lanzado el crustáceo *Mesocyclops* sobre las larvas del mosquito *Aedes aegypti*. Entre 1998 y 2003 se diseminó el diminuto depredador en los depósitos de agua. El resultado fue la eliminación del mosquito en 32 municipios vietnamitas. Desde 2002, no se ha informado de ningún caso de dengue en esas poblaciones; han quedado protegidas 380.000 personas. (La tasa de incidencia anual antes del inicio del programa ascendía a 146 casos por 100.000.) Esta solución podría no resultar eficaz en todas partes, dada la aversión que se suele tener hacia los organismos visibles en el agua potable.

—Charles Q. Choi



El portador del dengue puede haber encontrado la horma de su zapato en los copépodos.

STEVE GSCHMEISSNER *Science Photo Library*

ASTRONOMIA

Un mapa esculpido

Los trabajos de Hiparco, de la segunda mitad del siglo II antes de la era cristiana se cuentan entre los más importantes de la astronomía de la antigüedad. A Hiparco se le debe el descubrimiento del fenómeno de la precesión: el retraso paulatino de la posición de las estrellas en la bóveda celeste. Levantó el primer mapa preciso del firmamento, en el que según parece aparecerían entre 800 y 1600 estrellas. Los astrónomos de tiempos posteriores solían referirse a este catálogo, que se creían perdido para siempre. De todos los escritos de Hiparco sólo nos han llegado los *Comentarios*, donde su autor describe las constelaciones.

B. Schaeffer ha encontrado el catálogo estelar en un medio inesperado: la estatua del Atlas Farnesio, un mármol de más de dos metros de altura que representa al titán Atlas portando un globo celeste sobre sus espaldas. Esta escultura, conservada en Nápoles, es una copia romana realizada en el siglo II a partir de un original griego. Sobre el globo, de un diámetro de 65 centímetros, 41 figuras representan constelaciones conocidas por los helenos y se encuentran cinceladas; lo están también círculos de la esfera celeste: el ecuador, la eclíptica, los trópicos, el círculo ártico (el paralelo que contiene las estrellas siempre visibles) y el círculo antártico (con las estrellas siempre invisibles) y los coluros, (dos círculos de referencia perpendiculares al ecuador).

Las observaciones astronómicas que habían servido de modelo para ese globo celeste han venido envueltas en la controversia desde el siglo XVII. Según Schaeffer se construyó basándose en un catálogo de Hiparco elaborado hacia el 129 a.C. Para demostrarlo ha localizado con precisión 70 estrellas con ayuda de 49 placas tomadas controlando la distancia entre el objetivo y la estatua. Se apoyó luego en el fenómeno de la precesión para determinar la fecha a la cual las constelaciones representadas son observables. El eje de rotación de la Tierra oscila según un ciclo de 26.000 años. Las constelaciones se retrasan lentamente en el cielo en relación con líneas fijas (por ejemplo, el ecuador y los meridianos de referencia). Al medir esa demora sobre el globo, Schaeffer ha mostrado que ésta corresponde al firmamento a finales del siglo II antes de la era cristiana: las observaciones datan muy probablemente de 125 a.C.

GEOFISICA

Aurora inducida por radio

El espectral resplandor de la aurora se presenta cuando los electrones e iones de elevada energía excitan los gases atmosféricos. Con haces de radioondas se había inducido una luz similar, pero las emisiones resultaban demasiado débiles para ser detectadas a simple vista. Se han enfocado antenas de radio sobre una aurora natural, en Alaska. El blanco era una zona de la atmósfera más baja de lo usual, a unos 100 kilómetros de altura, donde los iones se disipan rápidamente en comparación con altitudes mayores. Aparecieron durante algunos minutos unas pequeñas motas entre el resplandor de fondo, lo bastante brillantes para ser vistas directamente. Este procedimiento podría aplicarse a la investigación atmosférica. *—J. R. Minkel*



Aurora sobre Alaska con un moteado artificial producido por una agrupación de antenas (*primer plano*).

ENTOMOLOGIA

El descenso de las hormigas

No se dejan caer: 25 especies de hormigas arbóreas de Panamá, Costa Rica y Perú regresan planeando a los árboles donde viven. Es el primer caso conocido de insectos ápteros que guían su caída. Con laca de uñas blanca en las patas traseras de los insectos y tomas de vídeo de gran velocidad se observó que, al soltarlas desde 30 metros de altura, maniobran para planear y volver a un árbol. Ejecutan giros de 180 grados en pleno aire. En la operación, parecen intervenir las ondulaciones de su abdomen, unas patas traseras aerodinámicamente aplanadas y unas cabezas redondeadas dotadas de unos rebordes que podrían actuar de timones. Un ochenta y cinco por ciento de las hormigas obreras de la especie *Cefalotes atratus* retornaron a sus albergues arbóreos tras la caída. A los diez minutos, suelen haber caminado ya hasta la rama de partida. Según parece, las hormigas se arrojan adrede desde los árboles para esquivar a los depredadores. *—Charles Q. Choi*

PSICOLOGIA

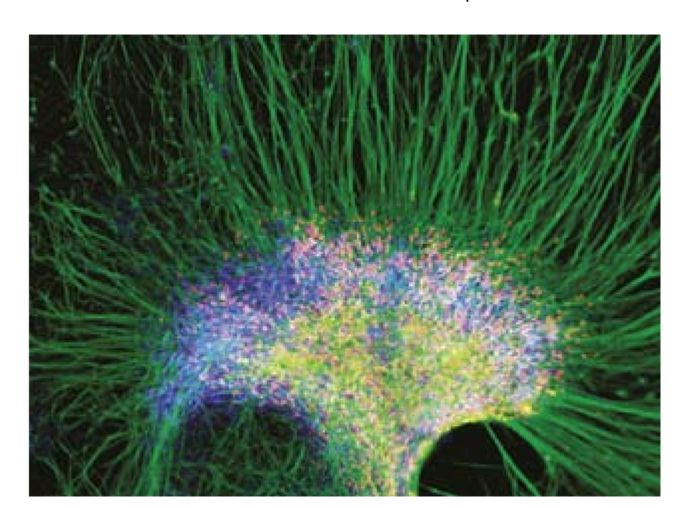
Ni hoy, ni mañana

¿Por qué resulta tan difícil no dejar para mañana lo que se puede hacer hoy? Se ha estudiado a 900 voluntarios para averiguarlo. Se vio que tendían a idealizar el futuro. A los voluntarios, por ejemplo, se les preguntaba cuándo creían que tendrían más tiempo y cuándo más dinero, hoy o justo dentro de un mes, a lo que respondían con números, de 1 (más hoy) a 10 (más dentro de un mes). Tanto para el dinero como para el tiempo, creían que tendrían más dentro de un mes, pero la media en el caso del tiempo fue 9, mientras que para el dinero fue 7. No había correlación entre creer que se tendrá más tiempo y más dinero al mes siguiente; no intervenía un optimismo general acerca de ambas cosas. Cuesta creer que las exigencias de mañana vayan a ser tan grandes como las que nos presionan hoy. Se actúa conforme a esa fantasía acerca del futuro. Cuando llega mañana, se está de nuevo tan ocupado como ayer y lo prometido vuelve a diferirse.

CELULAS MADRE

Neuronas motoras espinales

Se ha logrado la diferenciación de células madre embrionarias humanas en neuronas motoras espinales, células filiformes que transmiten señales desde la médula espinal a las extremidades y cuya muerte paraliza a quienes han sufrido lesiones y enfermedades medulares. Cuando un embrión se desarrolla en el útero, una cambiante mezcla de factores químicos incita a las células madre a diferenciarse en diversos tipos de neuronas. Una combinación de ácido retinoico y una molécula marcadora llamada "erizo sónico" imita las circunstancias en que las células madre se convierten en neuronas motoras espinales. Con ella se han podido cultivar las células a voluntad. El resultado quizá conduzca a fármacos y tratamientos que actúen contra las enfermedades de la médula espinal. *—J. R. Minkel*



Se puede inducir a las células madre embrionarias a diferenciarse en neuronas motoras (*rojo*). Aquí también se ven fibras neurales (*verde*) y ADN nuclear (*motas azules*).

RICK FRIEDMAN *Corbis* (*arriba*); CORTESIA DE SU-CHUN ZHANG (*abajo*)

Helicobacter pylori

Esta bacteria colonizadora del estómago humano protege frente a los trastornos del esófago pero aumenta el riesgo de contraer enfermedades gástricas. ¿Resulta conveniente erradicarla?

Martin J. Blaser

A pesar de que *Helicobacter pylori* acompaña al ser humano desde tiempos inmemoriales, los expertos han tardado más de un siglo en identificarla. En 1875, anatomistas alemanes descubrieron unas bacterias espiriformes que colonizaban el revestimiento mucoso del estómago humano; pero, al no conseguir que los microorganismos crecieran en un cultivo puro, los resultados se abandonaron y terminaron por olvidarse. Las bacterias no se aislarían hasta 1982. A Barry J. Marshall y J. Robin Warren les debemos una hazaña que permitió abordar la investigación de la función de *H. pylori* en el estómago.

En el curso del decenio siguiente, se descubrió que las personas portadoras de la bacteria corren un riesgo mayor de sufrir úlceras pépticas: desgarramiento del revestimiento que tapiza el tubo digestivo; se descubrió también que *H. pylori* promueve la aparición del cáncer de estómago más común [*véase* "Origen bacteriano de la úlcera de estómago", de Martin J. Blaser, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1996].

Al par que se iba conociendo la importancia de *H. pylori*, se observó que la bacteria perdía posiciones en el aparato digestivo. Mientras que en los países en vías de desarrollo los adultos suelen dar alojamiento a la bacteria, en los países desarrollados se ha reducido de forma notable su implantación. Según los epidemiólogos, *H. pylori* ha ido desapareciendo de las naciones desarrolladas a lo largo de los últimos 100 años merced a una mayor higiene, que bloquea la transmisión de la bacteria, y al uso generalizado de antibióticos.

Con el retroceso de *H. pylori* han disminuido la úlcera péptica y el cáncer de estómago. Al propio tiempo, sin embargo, los trastornos del esófago —la enfermedad del reflujo ácido y un tipo de cáncer de esófago particularmente letal, entre otros— han experimentado un crecimiento vertiginoso. Hay pruebas de que ese aumento de las enfermedades esofágicas guarda relación con la desaparición de *H. pylori*.

La posibilidad de que esta bacteria proteja contra determinadas patologías del esófago entraña consecuencias de suma importancia. De entrada, habría que reconsiderar quizá los tratamientos basados en antibióticos que erradican del estómago a *H. pylori*, para asegurarse de que el daño no supere el beneficio. Si queremos conocer el efecto ejercido por *H. pylori* sobre la salud, habrá que investigar la compleja trama de interacciones que el microorganismo teje con su huésped. A la postre, el estudio de *H. pylori* puede ayudarnos a entender otras bacterias que colonizan nuestro organismo, así como los procesos evolutivos que permiten que humanos y bacterias establezcan entre sí relaciones tan estrechas.

Diversidad bacteriana

En cuanto comenzó a investigarse *H. pylori*, se hizo palmaria la diversidad de las cepas aisladas a partir de individuos distintos. (Disparidad que se aprecia incluso dentro de un mismo estómago.) Pese a su apariencia idéntica, el código genético de las cepas varía de una forma sustantiva. Se ha secuenciado el genoma de dos cepas distintas de *H. pylori*; cada una presenta un solo cromosoma, pequeño, de unos 1,7 millones de nucleótidos, que comprenden unos 1550 genes. (A modo de comparación, la bacteria intestinal *Escherichia coli* cuenta con unos cinco millones de nucleótidos y, los seres humanos, unos 3000 millones.) Cabe destacar que alrededor del seis por ciento de los genes de *H. pylori* difieren de una cepa a otra; incluso las secuencias de nucleótidos de los genes comunes ofrecen un grado notable de variación.

Nos hallamos ante una especie de sorprendente nivel de diversidad. Las diferencias genéticas entre chimpancés y humanos, que son especies distintas entre sí, resultan despreciables en comparación con la disparidad entre cepas de *H. pylori*: el 99 por ciento de las secuencias de nucleótidos del genoma humano y del chimpancé son idénticas. La variabilidad extraordinaria en el genoma de *H. pylori* sugiere que o bien las bacterias han subsistido durante largo tiempo como especie o bien ninguna de sus variantes está tan cabalmente adaptada al estómago humano como para desplazar a las demás. En realidad, ambos enunciados son correctos.

1. UNA ESTRECHA RELACION ha surgido entre el ser humano y *Helicobacter pylori*. Esta bacteria provoca inflamaciones en el estómago y el duodeno (*rojo*), al propio tiempo que protege el esófago (*verde*). Se cree que intercambia señales complejas con las células del huésped.

JOSEPH DANIEL FIEDLER



En mi laboratorio de la facultad de medicina de la Universidad de Nueva York hemos identificado dos tipos de variantes. En 1989 creamos una biblioteca de genes de *H. pylori*. Para ello insertamos fragmentos seleccionados del ADN de la bacteria en células de *E. coli*, de forma que éstas sintetizaran las proteínas codificadas por los genes de *H. pylori*. Luego analizamos las muestras de *E. coli* resultantes mediante el suero sanguíneo de una persona portadora de *H. pylori*. El sujeto que se prestó voluntario fui yo mismo; puesto que mi sistema inmunitario había estado expuesto a la bacteria, los anticuerpos de mi suero reconocerían algunos de los productos proteicos del microorganismo.

La primera muestra en ser reconocida por mis anticuerpos contenía un gen que ahora denominamos *cagA*, codificador de la proteína CagA; se trataba del primer gen de *H. pylori* hallado sólo en algunas cepas de la bacteria. La investigación ulterior puso de manifiesto que las personas infectadas con cepas de *H. pylori* portadoras del gen *cagA* presentaban mayor riesgo de sufrir una úlcera péptica o cáncer de estómago que las personas con cepas carentes del gen.

Sabemos hoy que *cagA* se halla en una región cromosómica que contiene también genes codificadores de proteínas del sistema de secreción de tipo IV (TFSS). Las células bacterianas ensamblan estos sistemas para exportar moléculas complejas y de gran tamaño hacia el interior de las células del huésped. Así, *Bordetella pertussis*, bacteria causante de la tos ferina, utiliza un TFSS para introducir su toxina en las células del tracto respiratorio humano. En el año 2000, investigadores de laboratorios de distintos países (Alemania, Japón, Italia y Estados Unidos) determinaron que varios genes de *H. pylori* próximos a *cagA* codificaban proteínas TFSS que se ensamblaban y formaban una estructura semejante a una aguja hipodérmica en miniatura. Esta estructura inyecta la proteína CagA en las células epiteliales que recubren el estómago humano; por eso mismo, mi organismo produjo anticuerpos contra la proteína.

Una vez en el interior de la célula epitelial, determinadas enzimas del huésped modifican la estructura química de CagA, facilitando su interacción con proteínas humanas. Estas interacciones afectan, en última instancia, a la forma de la célula, a sus secreciones y a las señales que envía a otras células. Las cepas de *H. pylori* portadoras del gen *cagA* provocan inflamaciones y lesiones tisulares del revestimiento gástrico más graves que las cepas carentes del gen. Estas diferencias quizás expliquen el mayor riesgo de contraer enfermedades que presentan las personas portadoras de cepas *cagA*.

A finales de los años ochenta, Timothy Cover, a la sazón becario posdoctoral de nuestro grupo, acometió el estudio de algunas cepas de *H. pylori* que provocaban la formación de enormes vacuolas en células epiteliales de cultivo. Demostramos que el agente activo era VacA, una toxina codificada por el gen *vacA*. (La denominación surgió en el propio laboratorio.) Además de formar vacuolas, VacA desactiva los glóbulos blancos que luchan contra las infecciones estomacales, aplacando así la respuesta inmunitaria hacia *H. pylori*. A diferencia de *cagA*, *vacA* está presente en todas las cepas de *H. pylori*; sin embargo, puesto que la secuencia del gen varía de forma notable, sólo algunas de las cepas producen una toxina totalmente activa. John C. Atherton, becario posdoctoral visitante en nuestro laboratorio, halló cuatro variantes principales de *vacA*: dos de ellas (m1 y m2) localizadas en la región central del gen y otras dos (s1 y s2) en la región que codifica la secuencia de la señal de la proteína: la que permite a la proteína atravesar las membranas celulares. Estudios posteriores mostraron que la variante s1 se divide, a su vez, en al menos tres subtipos: s1a, s1b y s1c.

Las cepas de *H. pylori* portadoras de las variantes m1 y s1 sintetizan la versión más dañina de la toxina VacA. Por tanto, no resulta sorprendente que las cepas que incluyen *vacA* y *cagA* en su genotipo guarden relación con un mayor riesgo de contraer cáncer de estómago. La situación puede resultar aún más complicada: algunas personas presentan mayor tendencia a desarrollar este tipo de cáncer porque sus propios genes contienen variantes que intensifican la respuesta inflamatoria frente a agentes bacterianos. El peor escenario correspondería, pues, al de una persona portadora de variantes proinflamatorias y colonizada por cepas de *H. pylori* con el gen *cagA* y el genotipo *vacA* s1/m1. La concurrencia de cepas agresivas de *H. pylori* y huéspedes susceptibles explica la mayor parte de los casos de cáncer de estómago.

Tras el rastro de las migraciones

El conocimiento sobre la diversidad génica de *H. pylori* se aplicó al estudio de la variación geográfica de las distintas cepas. En colaboración con Leen-Jan van Doorn, del Laboratorio de Diagnósticos de Delft, descubrimos que las variantes del gen *vacA* tendían a agruparse en determinadas regiones geográficas: las cepas s1c predominaban en el este de Asia, s1a en Europa septentrional y s1b en el área mediterránea.

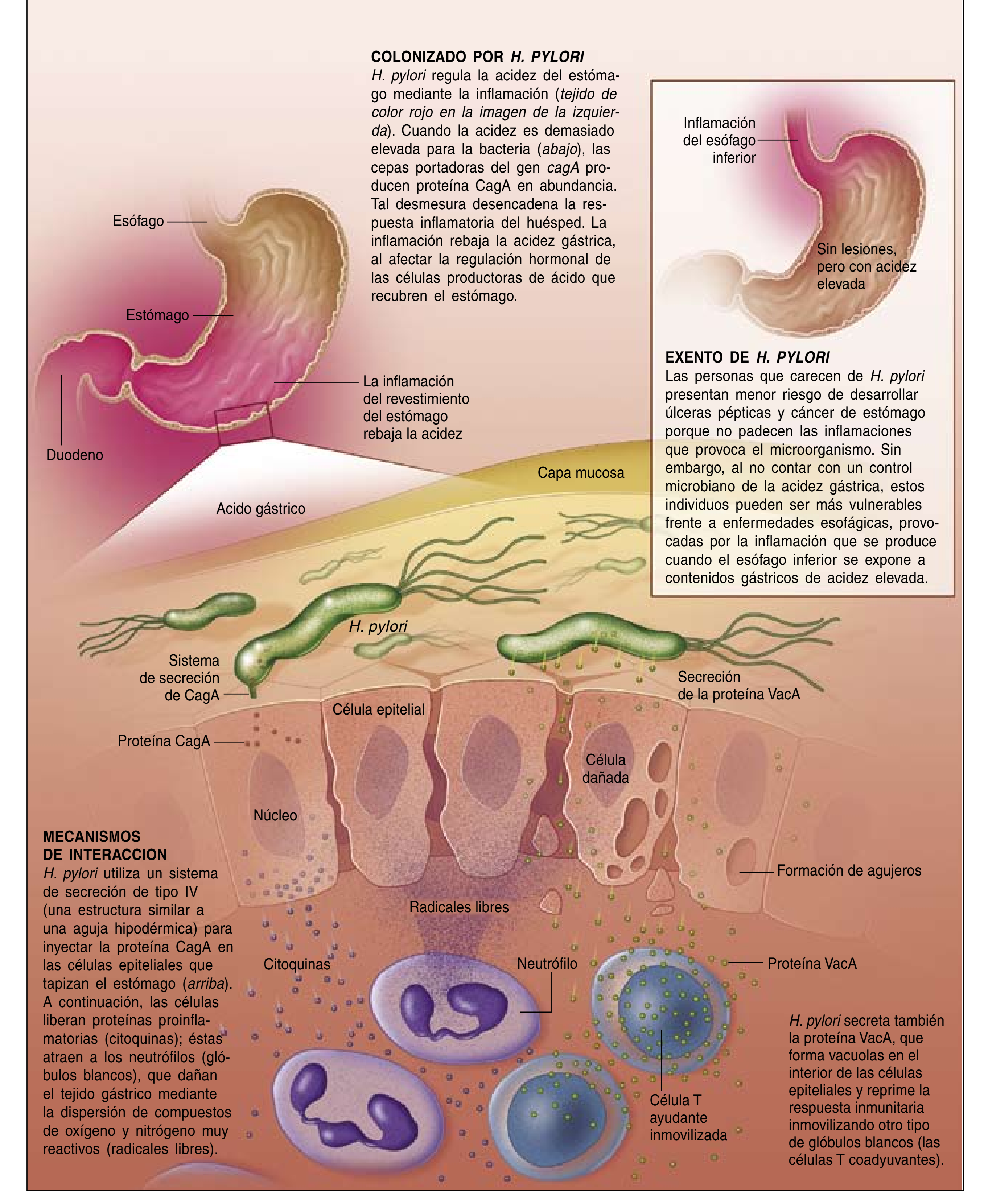
A Guillermo I. Pérez Pérez y al autor le interesaban sobre todo el estudio de las cepas de *H. pylori* en Iberoamérica porque los resultados allí obtenidos nos revelarían cuándo y cómo llegaron las bacterias al Nuevo Mundo. Descubrimos que la cepa

Resumen/*Una bacteria en el estómago*

- Aunque *Helicobacter pylori* ha colonizado el estómago humano durante largo tiempo, las mejoras sanitarias llevadas a cabo en el transcurso del siglo pasado y el uso generalizado de los antibióticos han reducido de forma drástica su prevalencia en los países desarrollados.
- Las personas portadoras de *H. pylori* presentan un mayor riesgo de desarrollar úlceras pépticas y cáncer de estómago, pero menor vulnerabilidad ante enfermedades esofágicas, incluido cierto tipo de cáncer de esófago letal.
- El estudio de las interacciones entre *H. pylori* y el ser humano podría arrojar luz sobre el tratamiento de los trastornos del tracto digestivo así como ahondar en la comprensión de otras bacterias que colonizan nuestro organismo.

UN MICROMUNDO EN EL ESTOMAGO

Helicobacter pylori persiste durante decenios en el estómago humano; a pesar de la respuesta inmunitaria del huésped, provoca una lesión permanente. Se cree que los microorganismos y el huésped intercambian señales en un bucle de retroalimentación negativa que amortigua el daño en el tejido y mantiene un ambiente favorable para las bacterias.



TAMI TOLPA

DISTRIBUCION GEOGRAFICA

La bacteria *H. pylori* destaca por su carácter antañón y por ofrecer una amplia diversidad genética. La distribución geográfica de sus cepas refleja los orígenes y las migraciones de sus huéspedes humanos. La variante s1a del gen *vacA* predomina en el norte de Europa, mientras que las variantes s1b y s1c prevalecen en el área mediterránea y en el este de Asia, respectivamente.

LUCY READING-IKKANDA

mediterránea (s1b) era, con diferencia, la más común; ello sugería que *H. pylori* fue introducida por colonos españoles o portugueses o por esclavos africanos. Pero entonces caímos en la cuenta de que estos estudios se habían llevado a cabo en ciudades costeras, cuyos habitantes no procedían sólo de europeos y africanos, sino también de amerindios.

En colaboración con María Gloria Domínguez Bello, del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, analizamos muestras de tejido gástrico procedentes de una población indígena de la Amazonia (Puerto Ayacucho, pueblo comercial a orillas del río Orinoco, en Venezuela); la mayor parte de las cepas resultaron portadoras del genotipo s1c, el que predomina en el este de Asia. Los nuevos datos apuntaban, pues, otra hipótesis, a saber, que *H. pylori* fue transportada a través del estrecho de Bering por los antepasados de los amerindios actuales. Por tanto, esta bacteria ha estado presente entre los humanos durante al menos 11.000 años.

Recientes estudios en colaboración con Mark Achtman, Daniel Falush y sus colaboradores del Instituto Max Planck de Biología de las Infecciones en Berlín, han demostrado que todas las cepas modernas de *H. pylori* proceden de cinco poblaciones ancestrales: dos surgidas en Africa, dos en la Eurasia central u occidental y una en el este de Asia. De hecho, podemos apoyarnos en la variabilidad genética de *H. pylori* para seguir el rastro de los asentamientos humanos y los patrones migratorios en el transcurso de los últimos 60.000 años. Teniendo en cuenta que *H. pylori* presenta mayor diversidad genética que *Homo sapiens*, las bacterias jalonan mejor la historia de los movimientos migratorios de nuestra especie que la propia investigación del ADN mitocondrial humano (el marcador habitual en los estudios de genética de poblaciones). Si los estudios mitocondriales aportan datos sobre la manecilla de las horas, las secuencias genéticas de *H. pylori* informan sobre la manecilla de los minutos.

Extinción microbiana

H. pylori medra sólo en el ser humano. Se transmite de boca a boca o de heces a boca. Las diferencias geográficas observadas en la tasa de infección por *H. pylori* (harto menor en el mundo desarrollado que en el resto) podrían resultar, en parte, de las mejoras sanitarias aplicadas durante el último siglo. En mi opinión, la eliminación gradual de *H. pylori* se debe también al uso generalizado de antibióticos. (Incluso los tratamientos antibióticos de corta duración —cualquiera que sea el motivo de su administración— pueden erradicar la bacteria en algunos pacientes.) En los países en vías de desarrollo don-

de el uso de antibióticos está menos extendido, entre el 70 y el 100 por ciento de los niños están infectados por *H. pylori* a la edad de 10 años; la mayoría permanecen colonizados de por vida. En cambio, menos del 10 por ciento de los niños nacidos hoy en los EE.UU. son portadores de la bacteria. Nos hallamos ante un importante cambio en la ecología microbiana de nuestra especie.

Tras la desaparición de *H. pylori* quizá se esconda también la extinción de otros microorganismos. La presencia de *H. pylori* puede determinarse fácilmente mediante análisis de sangre, heces, aliento o muestras de tejido gástrico, puesto que es la única bacteria que subsiste en el ambiente ácido del estómago humano. Las bacterias colonizadoras de otras partes del cuerpo —boca, colon, piel y vagina, entre otros—, en cambio, conviven con otros microorganismos indígenas; por tanto, si alguna de éstas estuviese desapareciendo, careceríamos de herramientas diagnósticas para detectarlo.

¿Cuáles son las consecuencias del retroceso de *H. pylori*? Como ya se ha indicado, en los países desarrollados la incidencia de la úlcera péptica (excepto la originada por la aspirina o por el ibuprofeno u otros agentes antiinflamatorios no esteroides) y del cáncer de estómago están disminuyendo de forma clara. Dado que estas enfermedades —sobre todo el cáncer de estómago— se desarrollan en el transcurso de varios años, la disminución de su incidencia se ha retrasado varios decenios en relación con el descenso de las infecciones por *H. pylori*; aun así, la disminución resulta asombrosa. En 1900, el cáncer de estómago era el más letal de EE.UU.; en 2000, su incidencia y su tasa de mortalidad habían descendido más del 80 por ciento, colocándose muy por debajo del cáncer de colon, próstata, mama o pulmón, entre otros. Abundan las pruebas de la asociación entre una regresión sin freno de *H. pylori* y ese cambio.

Pero no todo son buenas noticias. Durante ese mismo periodo, se ha producido un aumento en la incidencia de un nuevo tipo de enfermedades esofágicas. Desde los años setenta, epidemiólogos estadounidenses, británicos, suecos y australianos han detectado un brote alarmante del adenocarcinoma de esófago, un cáncer agresivo que se desarrolla en el revestimiento interno del esófago, justo por encima del estómago. En Estados Unidos, la incidencia de esta enfermedad ha ido creciendo entre un 7 y un 9 por ciento anual, convirtiéndose en el cáncer con mayor tasa de aumento del país. La supervivencia a los cinco años posteriores al diagnóstico es inferior al diez por ciento.

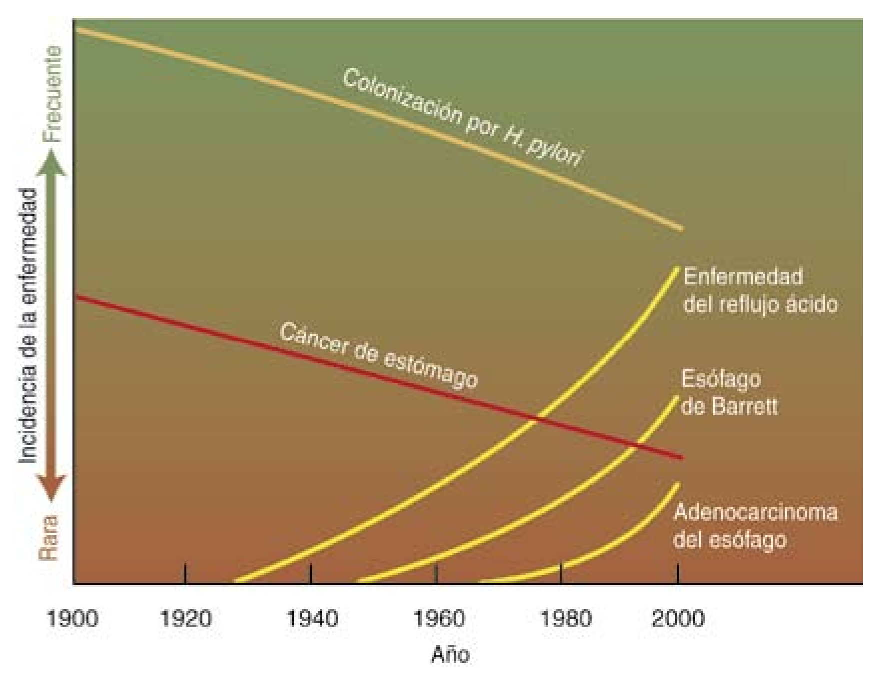
¿Cuál es el origen de tan terribles cánceres? Sabemos que el principal factor de riesgo proviene de la enfermedad del reflujo gastroesofágico (ERGE), un trastorno inflamatorio crónico que implica la regurgitación de los contenidos gástricos ácidos al esófago. Más conocida como enfermedad de reflujo ácido, no apareció su descripción clínica hasta los años treinta del siglo pasado. Desde entonces, sin embargo, su incidencia ha aumentado de forma espectacular; en la actualidad, ERGE es bastante común en los EE.UU. y en otros países occidentales.

La enfermedad del reflujo gastroesofágico puede dar lugar al esófago de Barrett, una lesión premaligna. Debe su nombre a Norman Barrett, quien la describió en 1950. La incidencia del esófago de Barrett está creciendo al mismo ritmo que la de ERGE; los pacientes presentan un elevado riesgo de desarrollar adenocarcinoma de esófago. La enfermedad del reflujo gastroesofágico puede iniciar un proceso de entre 20 y 50 años; en algunos casos, la enfermedad avanza lentamente hasta convertirse en esófago de Barrett primero y en adenocarcinoma después, de forma análoga a los cambios graduales que desembocan en cáncer en otros tejidos epiteliales. Pero, ¿por qué está aumentando la prevalencia de ERGE y sus trastornos derivados?

El aumento de estas enfermedades ha coincidido con la desaparición de *H. pylori* ¿Existe alguna relación entre ambos fenómenos? Cuando en 1996 sugerí esta conexión, fue acogida con indiferencia al principio y con hostilidad después. Sin embargo, un número creciente de estudios realizados en los últimos años respaldan la hipótesis de que la colonización del estómago por *H. pylori* protege al esófago frente a ERGE y sus secuelas. Y lo que reviste interés mayor, las cepas portadoras del gen *cagA* —las más virulentas a la hora de provocar úlceras y cáncer de estómago— parecen ser las que proporcionan mayor protección. En 1998, en colaboración con expertos del Instituto Nacional del Cáncer, descubrimos que el riesgo de contraer adenocarcinoma del esófago inferior y de la zona del estómago más cercana al esófago era significativamente menor en las personas portadoras de las cepas *cagA* de *H. pylori*. Posteriormente, en colaboración con investigadores del Hospital Clínico de Cleveland y del Hospital holandés Erasmus, demostramos una correlación parecida para ERGE y para el esófago de Barrett. Otras investigaciones, realizadas en el Reino Unido, Brasil y Suecia, lo han confirmado. Contamos, pues, con pruebas convincentes del efecto protector de *H. pylori*, aunque no todos los investigadores lo han observado,


2. EL REVESTIMIENTO MUCOSO del estómago humano constituye el hábitat natural de *H. pylori*.

PHOTO INSOLITE REALITE & V. GREMET/PHOTO RESEARCHERS, INC.



3. EL DECLIVE de *H. pylori* en los países desarrollados durante la última centuria ha reducido la incidencia del cáncer de estómago; sin embargo, puede estar desencadenando un brote de enfermedades esofágicas. En ocasiones, la enfermedad del reflujo ácido evoluciona en esófago de Barrett (una lesión premaligna), para terminar en adenocarcinoma, un tipo de cáncer particularmente letal. Debido al carácter fragmentario de los datos históricos referentes a determinados trastornos, las líneas de la figura muestran sólo la tendencia general de la incidencia de cada patología.



debido, quizás, a diferencias en los métodos de estudio.

Retroalimentación negativa

¿Cómo puede la colonización por *H. pylori* aumentar el riesgo de contraer enfermedades gástricas y a la vez proteger frente a los trastornos del esófago? Hallamos una posible explicación en las interacciones entre la bacteria y su huésped. En el transcurso de la evolución, *H. pylori* se ha convertido en un parásito atípico: a pesar de provocar una lesión permanente y la respuesta inmunitaria del huésped, persiste durante decenios en el interior del estómago. Esta persistencia sólo es posible si los procesos que estimulan la inflamación del tejido gástrico están compensados por procesos inhibitorios, que evitan el empeoramiento excesivo de la lesión. Debe establecerse un equilibrio entre huésped y colonizador; de lo contrario, el huésped moriría en poco tiempo y las bacterias perderían su hogar antes de encontrar ocasión para colonizar otro individuo. Pero, ¿cómo logran dos formas de vida que compiten entre sí alcanzar compromiso semejante? Para mí, el microorganismo y el huésped se comunican en un bucle de retroalimentación negativa.

En los sistemas biológicos abundan los bucles de retroalimentación negativa; regulan las interacciones celulares. Consideremos, por ejemplo, el que se establece entre la glucosa y la insulina, una hormona reguladora. Tras la ingesta, aumentan los niveles de glucosa en el torrente sanguíneo; el páncreas secreta insulina. La hormona provoca el descenso de los niveles de glucosa, señal que avisa al páncreas para que reduzca la secreción de insulina. Modulando los valores máximos y mínimos del nivel de glucosa, el sistema se mantiene en un estado estacionario de homeostasis. Descrito en el siglo XIX por Claude Bernard, este concepto se ha convertido en el fundamento para comprender la autorregulación hormonal.

Llevé esta idea un paso adelante: la retroalimentación negativa podía poner en juego no sólo las células microbianas sino también las del huésped. Con los años, y en colaboración con Denise Kirschner, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, y Glenn Webb, de la Universidad de Vanderbilt, nuestra idea sobre la retroalimentación ha ganado en amplitud y complejidad. Hoy la expresamos así: la población de *H. pylori* en el estómago de una persona está formada por un grupo de cepas extremadamente diversas que cooperan y compiten entre sí; compiten por los nutrientes, por nichos en el interior del estómago y por la protección frente al estrés. Milenios de coevolución entre *H. pylori* y *Homo sapiens* han ejercido una intensa presión de selección sobre ambas especies. Para minimizar los daños de la infección, el ser humano ha desarrollado mecanismos de transmisión de señales a las bacterias, mediante respuestas inmunitarias y cambios en la presión y acidez del estómago. A su vez, *H. pylori* envía señales a las células del huésped a fin de aliviar el estrés provocado sobre sí misma.

El grado de acidez en el interior del estómago constituye uno de los mayores factores de estrés para *H. pylori*. Demasiado ácido mata a las bacterias; pero un nivel extremadamente bajo tampoco resulta adecuado, pues permite que *E. coli* y otros organismos que toleran peor los medios ácidos invadan el nicho de *H. pylori*. Ante este escenario, *H. pylori* ha desarrollado la capacidad de regular la acidez de su entorno. Las cepas portadoras del gen *cagA*, por ejemplo, utilizan la proteína CagA como molécula señalizadora. Cuando la acidez es elevada, la sintetizan en gran cantidad; ello desencadena una respuesta inflamatoria del huésped que disminuye la acidez mediante la regulación hormonal de las células productoras de ácido que recubren el estómago. Una acidez baja, en cambio, disminuye la producción de CagA y, por tanto, reduce la inflamación.

Este modelo de retroalimentación negativa nos ayuda a entender los efectos de *H. pylori* sobre la salud, que dependen en gran medida de la intensidad de las interacciones que se establecen entre las bacterias y su huésped. Las cepas *cagA* aumentan el riesgo de padecer cáncer de estómago porque, durante decenios, inyectan proteína CagA en las células epiteliales del estómago, afectando a la longevidad de las células del huésped y su tendencia a provocar inflamaciones que favorecen la aparición

del cáncer. Las cepas que carecen de *cagA* muestran menor grado de interacción con el huésped, por lo que no provocan lesiones tan graves en los tejidos gástricos.

Asimismo, las cepas *cagA* modulan la producción de ácido en el estómago, evitando que la acidez se eleve demasiado. En las personas portadoras de cepas que carecen de *cagA*, la modulación de la acidez es más débil. Las que no han sido colonizadas por *H. pylori* no cuentan con ningún tipo de control microbiano; las consiguientes oscilaciones en la acidez del estómago podrían resultar decisivas para el aumento de las enfermedades del esófago, cuyo desencadenante parece ser la exposición del tejido a contenidos gástricos de acidez elevada.

De la ausencia de *H. pylori* podrían derivarse otros efectos fisiológicos. El estómago produce dos hormonas que regulan los hábitos alimentarios: la leptina, que envía señales al cerebro para que dejemos de comer, y la grelina, que estimula el apetito. La erradicación de *H. pylori* mediante antibióticos tiende a rebajar los niveles de leptina e incrementar los de grelina. En un estudio, los pacientes que se habían sometido a un tratamiento para eliminar *H. pylori* ganaron más peso que los sujetos del grupo control. ¿Podrían los cambios en la ecología microbiana del ser humano estar contribuyendo a la actual epidemia de obesidad y diabetes mellitus (enfermedad relacionada con la obesidad) en los países desarrollados? Si se confirmara tal hipótesis, las consecuencias serían determinantes. Debería replantearse la idoneidad de antibióticos que eliminan del estómago la bacteria *H. pylori* (y acaban también con bacterias que desempeñan funciones clave en otras partes del organismo). Aunque algunas de las consecuencias de la erradicación resultarían beneficiosas para nuestra salud (reduciría el riesgo de padecer cáncer de estómago, por ejemplo), otras laborarían en su contra. El balance entre lo bueno y lo perjudicial dependería de la edad, del historial médico y de las características genéticas.

Probióticos

Si se confirma que *H. pylori* podría resultar beneficiosa para ciertos individuos, ¿deberían los médicos reintroducir la bacteria en el estómago de estos pacientes? Durante más de una centuria, expertos y profanos se han dedicado a buscar probióticos, microorganismos que, incorporados en la dieta, mejoran la salud. Los primeros estudios se centraron en el género *Lactobacillus*, el utilizado en la fabricación de yogur y quesos; pero los efectos de la reintroducción fueron, en el mejor de los casos, marginales. A pesar de los esfuerzos y tiempo invertidos, nadie ha logrado aún hallar un probiótico efectivo.

Este fracaso se debe, en parte, a la complejidad y la coevolución de la microbiota humana, el conjunto de organismos con que compartimos nuestro cuerpo. Nuestros microorganismos han alcanzado un grado de evolución elevado, que les permite habitar dentro de nosotros y convivir entre sí. ¿Cuál es la probabilidad de que un recién llegado, una cepa bacteriana extraña procedente del exterior sea capaz de reconducir adecuadamente los mecanismos de interacción? Escasa. Los microorganismos de nuestra flora han sobrevivido a una selección intensa y continuada; la ventaja de "jugar en casa" les capacita para rechazar y eliminar a cualquier forastero.

Para proseguir con la búsqueda de probióticos, pues, deberemos ahondar en nuestra microbiota indígena y conocer mejor su relación con nosotros. Se establece siempre una red de interacciones complejas allí donde medran microorganismos colonizadores: colon, boca, piel y vagina, por ejemplo. La dificultad estriba en desentrañarlas, debido a la gran variedad de organismos competidores. En el estómago, en cambio, *H. pylori* desplaza casi por completo a los demás microorganismos. Merced a su increíble adaptación al ser humano y a su progresiva y accidental desaparición en el transcurso del siglo XX, *H. pylori* podría convertirse en un organismo modelo para la investigación de la ecología microbiana del ser humano.

Una vez catalogadas todas las cepas de *H. pylori* y determinado de qué modo afecta cada una a las células huésped del estómago, ese campo de investigación debería alumbrar nuevas vías terapéuticas de las enfermedades del tracto digestivo. En el futuro, la propensión de un individuo a la inflamación y su riesgo genético de padecer diversos tipos de cáncer quizá podrían conocerse mediante el análisis de su ADN. Entonces, bastaría con determinar la mejor mezcla de cepas de *H. pylori* para cada paciente e introducirla en su estómago. Los conocimientos sobre *H. pylori* podrían aprovecharse también para resolver otros problemas médicos. Lo mismo que la toxina nerviosa Botox producida por *Clostridium botulinum* (la bacteria causante del botulismo) se utiliza ahora en cirugía plástica, la toxina VacA podría constituir la base de un nuevo tipo de fármacos supresores de la función inmunitaria. El estudio de nuestros viejos compañeros bacterianos permite ahondar en la comprensión de nuestro propio cuerpo y promete expandir los horizontes de la microbiología médica.

El autor

Martin J. Blaser, microbiólogo experto en *Helicobacter pylori*, ocupa la cátedra Frederick H. King de la facultad de medicina de la Universidad de Nueva York. Preside la Sociedad estadounidense de Enfermedades Infecciosas.

Bibliografía complementaria

DYNAMICS OF *HELICOBACTER PYLORI* COLONIZATION IN RELATION TO THE HOST RESPONSE. Martin J. Blaser y Denise Kirschner en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 96, n.º 15, págs. 8359-8364; 20 de julio, 1999.

TRACES OF HUMAN MIGRATIONS IN *HELICOBACTER PYLORI* POPULATIONS. D. Falush, T. Wirth, B. Linz, J. K. Pritchard, M. Stephens, M. Kidd, M. J. Blaser, D. Y. Graham, S. Vacher, G. I. Pérez-Pérez, Y. Yamaoka, F. Mégraud, K. Otto, U. Reichard, E. Katzowitsch, X. Wang, M. Achtman y S. Suerbaum en *Science*, vol. 299, n.º 5612, págs. 1582-1585; 7 de marzo, 2003.

HELICOBACTER PYLORI PERSISTENCE: BIOLOGY AND DISEASE. Martin J. Blaser y John C. Atherton en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 113, n.º 3, págs. 321-333; febrero, 2004.



Condensados de y microchips

Jakob Reichel

Cabe aprovechar los campos magnéticos de un microchip para producir las pequeñas y ordenadas nubes de átomos conocidas como condensados de Bose-Einstein. Esa asociación de pastillas y condensados quizás encuentre aplicación práctica en sensores ultraprecisos para los aviones y en la computación cuántica

1. UNA NUBE ULTRAFRIA DE ATOMOS levita en el campo magnético que se produce cerca de la superficie de un simple microchip (se trata de una representación artística).

Bose-Einstein

KENN BROWN

Un siglo después de su concepción, la mecánica cuántica no deja de provocar desconcierto. Nos pide que atribuyamos a los objetos la condición de ondas, si bien demasiado pequeñas para que podamos percibir las de los cuerpos que nos rodean. Aunque se cree que las leyes cuánticas valen para objetos de todos los tamaños —de las partículas elementales al universo en su conjunto—, en nuestro mundo diario no vemos ondas de materia, ni ningún otro comportamiento cuántico.

De una forma sutil que se les escapa a los físicos, la mecánica cuántica encubre sus extraños efectos cuando muchas partículas interaccionan de manera desordenada o cuando la temperatura se eleva muy por encima del cero absoluto; es decir, siempre que las cosas se complican un poco, como sucede de ordinario en el mundo macroscópico. De ahí que se tienda a pensar que los fenómenos cuánticos sólo cuentan en el mundo de las partículas elementales o en experimentos mentales del estilo del gato de Schrödinger, que se encuentra en un estado cuántico tal, que está a la vez vivo y muerto.

Ultimamente, va viéndose la teoría cuántica de otra manera. Se está aprendiendo a preservar su rareza a escalas cada vez mayores y a observarla de modo más directo. Uno de los ejemplos más hermosos fue la creación de un condensado de Bose-Einstein (BEC) atómico en 1995. En un BEC, centenares de miles de átomos se agrupan en el mismo estado mecanocuántico. Todas sus ondas de materia individuales se superponen exactamente. Debido a que la onda de materia gigante que resulta contiene tantos átomos, es fácil observarla: en cuanto se dispone de un BEC, no se necesita mucho más que una cámara de vídeo para percibir la naturaleza ondulatoria de la materia.

Esta disponibilidad sin precedentes de las ondas de materia ha llevado a un verdadero auge de los BEC. Centenares de investigadores, tanto teóricos como experimentales, que trabajaban en muy distintas especialidades de la física, han dirigido su atención al nuevo campo. Durante los últimos años, el estudio de los BEC ha dado nueva vida experimental a muchos efectos cuánticos a los que antes se consideraba muy alejados de la práctica. La investigación de estos sistemas nos ha presentado los fenómenos cuánticos con mayor verismo, como una piedra que se puede ver y golpear directamente, no sólo como algo de lo que se habla en abstracto.

No resulta difícil observar un BEC. Pero nadie se atreía a crearlo. La transición de fase de un vapor atómico clásico (no cuántico) a un condensado cuántico ocurre a una temperatura bajísima, por lo general de menos de una millonésima de grado sobre el cero absoluto. Para alcanzar esta temperatura, se deben aislar los átomos en una cámara de vacío, suspenderlos en el espacio libre mediante campos magnéticos y congelarlos mediante enfriamiento láser y evaporación (*véase el recuadro* "Enfriar un gas de átomos"). La más leve interacción descontrolada con el mundo alrededor, que se halla a temperatura ambiente, destruiría el frágil estado cuántico de los átomos. Por eso, en la cincuentena de laboratorios de investigación que pueden ahora producir BEC, la minúscula nube de átomos superenfriados se protege con varias toneladas de equipo de alta tecnología. Algunos de esos aparatos producen los mejores vacíos que podemos conseguir para librar a los átomos de las colisiones violentas que a temperatura ambiente ocurren en los gases, en el aire.



2. UN CHIP CON ATOMOS atrapa sobre su superficie, en un experimento del laboratorio de Jörg Schmiedmayer, de la Universidad de Heidelberg, una nube de átomos de litio fríos. Se ve la imagen especular de la nube de átomos en la brillante superficie de arseniuro de galio recubierta de oro.

JÖRG SCHMIEDMAYER

Clave en estos experimentos son las trampas magnéticas, que ponen átomos a levitar por medio de campos magnéticos. El enfriamiento por evaporación sólo puede funcionar en una trampa; las magnéticas son las más adecuadas para ese modo de bajar la temperatura. Además, cuanto más intensa sea la trampa (cuanto más se concentren los átomos en un pequeño volumen), tanto más rápido y eficiente será el enfriamiento. Por ese motivo, los investigadores de los BEC rodean sus cámaras de vacío con potentes electroimanes. Para conseguir la mayor compresión magnética, han construido pesadas bobinas refrigeradas por agua, a menudo compuestas por voluminosos tubos de refrigeración, con un consumo de muchos kilowatt de energía eléctrica. El diseño y el funcionamiento de estas trampas magnéticas se han

Resumen/*Chips para nubes atómicas*

- Se va aprendiendo a preservar la rareza de la mecánica cuántica a escalas cada vez mayores. Se facilita así la observación y aplicación de los fenómenos a que da lugar. En uno de ellos, la formación de condensados de Bose-Einstein (BEC) queda patente la naturaleza ondulatoria de la materia.
- Los campos magnéticos que se crean sobre un microchip mantienen suspendida una nube de átomos en el vacío a una temperatura apenas por encima del cero absoluto. La nube se puede convertir así en un BEC. Tales "chips para nubes atómicas" tienen un tamaño menor que las trampas magnéticas corrientes, consumen una milésima parte de su potencia, funcionan mucho más deprisa y exigen un vacío menos exhaustivo.
- Cabe esperar que los chips para nubes atómicas valgan como sensores ultraprecisos, útiles en la navegación aérea o marítima, y para construir ordenadores cuánticos.

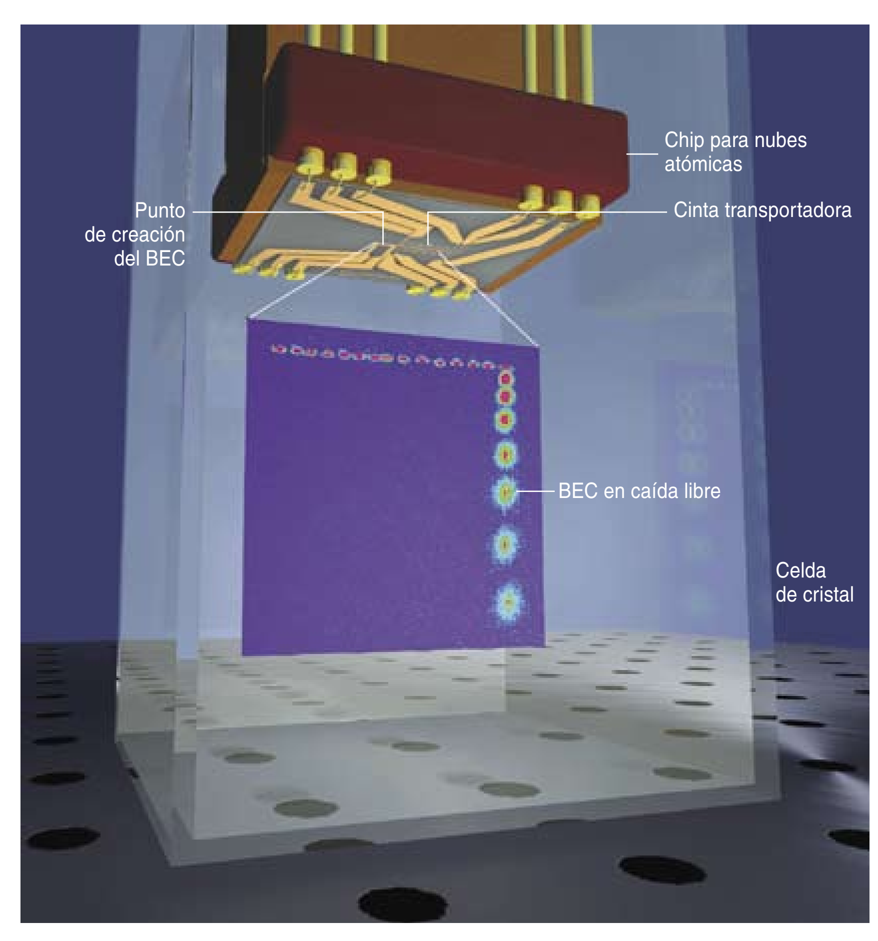
llevado buena parte del esfuerzo de los experimentos con BEC.

A la vista de esta complejidad experimental, a muchos les costaba imaginar alguna aplicación de los BEC en el mundo real; por ejemplo, en sensores de rotación portátiles que un día permitiesen que aviones o submarinos navegaran con una precisión sin precedentes. Algunos avances recientes han cambiado esta situación. En particular, ahora podemos atrapar, mover y manipular los átomos por medio de microchips. El laboratorio cuántico portátil que se necesitaría para los sensores ya no es un sueño descabellado, sino un objeto real de la investigación.

Un paisaje magnético

¿Cómo puede un microchip mantener y controlar una nube de átomos suspendida cerca de su superficie? Aprovechando los campos magnéticos que su propio funcionamiento crea. Los microchips contienen un complejo entramado de millares de cables microscópicos. Las corrientes que circulan por esos cables generan un campo magnético. De ordinario, pasa inadvertido; a una distancia macroscópica de la superficie del chip, escapa a toda medición. Muy cerca de los cables, sin embargo, crece como el inverso de la distancia. A 100 micras de la superficie, forma la trampa magnética que sostiene la nube de átomos en el espacio libre. Al hallarse los átomos tan cerca de los cables, basta menos de un watt para que funcione la trampa; valdría la batería de un ordenador portátil. Compárese esto con los kilowatt que necesitaban las trampas magnéticas tradicionales.

Y esta trampa de chip tiene una virtud aún mayor: es mucho más potente que las trampas con bobinas y puede crear un BEC en menos de un segundo. Las trampas con bobinas rara vez tardan menos de medio minuto en crear un condensado. Esa mayor velocidad es importante: hay que repetir los experimentos con BEC centenares de veces a fin de acumular estadísticas suficientes para una variedad de situaciones experimentales. Cada medición requiere la creación de un nuevo condensado de Bose-Einstein, para lo cual hay que obtener una hornada de átomos, atraparla y enfriarla desde la temperatura ambiente hasta casi el cero absoluto. También supone una gran ventaja para el sensor de rotación, donde una mayor velocidad se convierte en una precisión más alta (porque reduce el ruido).



3. UNA "CINTA TRANSPORTADORA" ATOMICA lleva y coloca con precisión condensados de Bose-Einstein (BEC). La cinta transportadora es la estructura de dientes cuadrados situada en el centro del chip. Produce una serie de pozos magnéticos cuya posición depende de la fase de las corrientes en los cables. La serie de imágenes del cuadrado púrpura se tomó mientras la cinta transportaba el condensado a lo largo de 1,6 milímetros sobre la superficie del chip. Acabado ese transporte, se dejó caer libremente el BEC. Se expandió como lo hacen los BEC: el frágil condensado había sobrevivido al transporte. (Se han incluido la estructura del chip y la celda de cristal para que quede clara la posición de la cinta transportadora.)

THEODOR W. HÄNSCH

La mayor velocidad simplifica el aparato de BEC de manera muy considerable. El vacío puede contener entonces cien veces más gas residual. Con un vacío pobre, las partículas remanentes despueblan constantemente la nube de átomos atrapados: chocan con ellos y los expulsan fuera de la trampa magnética. Cuando el enfriamiento es más rápido, cabe aceptar un número mayor de partículas remanentes porque tienen menos tiempo para deteriorar la nube. En consecuencia, esa mayor rapidez tolera una maquinaria de vacío mucho más sencilla; el vacío que necesita un BEC sobre chip apenas ha de mejorar el del interior de un tubo de televisión. Así, la miniaturización de la trampa magnética permite que se miniaturicen también otras partes del aparato.

A pesar de estas ventajas, intentar almacenar un condensado de Bose-Einstein —el objeto más frío del universo, que se sepa— a cientos de micras de una superficie a temperatura ambiente, la del microchip, no deja de parecer una locura. Tal superficie emite sin cesar radiación infrarroja, que transfiere calor a todo objeto que se halle en su vecindad.

¿Quién guardaría los cubitos de hielo junto a un radiador? El primer proyecto de una trampa en chips, presentado por un grupo del Instituto de Tecnología de California en 1995, enfriaba el chip hasta cerca del cero absoluto con un refrigerador de helio líquido, imponente y caro. Mi grupo quería preservar la atractiva simplicidad de la idea del chip y en 1997 eligió trabajar a temperatura ambiente y esperar lo mejor.

Por suerte, nuestras nubes de átomos ultrafríos son unos cubos de hielo raros. Un objeto sólido, un cubito de hielo, absorbe muy bien la radiación térmica. Los átomos gaseosos, por el contrario, absorben radiación sólo en ciertas longitudes de onda muy bien definidas; el gas apenas se queda con el calor radiado por el chip. Hoy sabemos que las interacciones térmicas resultan insignificantes a una distancia de 100 micras; a las escalas de tiempo de un experimento con BEC, no producen daños.

Cuando nació la idea de una trampa de chip, poco después de que se produjera el primer BEC en 1995, tuvo que salir al paso de problemas difíciles. Primero, había que diseñar y construir un chip que valiera para trampa. Aprender a hacerlo fue una de las experiencias más gratificantes que haya vivido. Siempre me ha impresionado la increíble velocidad a que progresa la industria microelectrónica, que afronta y supera nuevas dificultades cada año. Soy físico de átomos fríos; sólo tenía una vaga idea de las técnicas en que se funda ese progreso. Ahora las he conocido desde dentro. Hablando con especialistas, consultando libros y sitios de la Red, di con los dispositivos híbridos de película delgada: conductores de oro en pequeñas pastillas cerámicas con los que se podía atrapar átomos.

Una vez supimos cómo se construía un chip que sirviera de trampa, mis compañeros del Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching y de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich y yo abordamos el problema de cargar la trampa con átomos. Se utilice un sistema de bobinas o un chip, antes de que los átomos se puedan mantener en la trampa puramente magnética habrá que enfriarlos hasta una temperatura de un microkelvin mediante una trampa magnetoóptica (TMO). Un elemento esencial de una TMO es un conjunto de seis haces láser que bañan los átomos por los lados, por arriba y por abajo. El chip cortará al menos uno de los haces; la TMO dejará de funcionar.

La solución del problema estriba en disponer de un recubrimiento especular del chip y que refleje dos de los haces. Si los láseres y el chip se orientan de manera correcta, los haces reflejados sustituirán a los bloqueados y la TMO producirá una nube de átomos fríos justo sobre la superficie del chip. Hubo que tener en cuenta algunos detalles adicionales (la polarización de los haces láser ha de ser la correcta), pero la idea era atinada. A una trampa de ese tipo se la llama ahora TMO de espejo o TMO superficial. Una vez se han enfriado los átomos en la TMO de espejo, resulta harto sencillo cargarlos en la trampa de chip: se apaga la TMO y se deja pasar corriente por los cables de la pastilla. La mayor parte de la nube de átomos queda atrapada en el campo magnético que se genera así.

En 1998, en el Instituto Max Planck, Wolfgang Hänsel, Ted Hänsch y yo atrapamos y enfriamos átomos con ese procedimiento. Fue el primer "chip para nubes atómicas", pero muchos dudaban de que llegase a producir BEC, sobre todo por la proximidad de la superficie del chip a los átomos atrapados. En el verano de 2001, mi grupo y el de Claus Zimmermann, de la Universidad de Tubinga, demostraron que los que dudaban de la nueva técnica estaban equivocados. Cada uno por nuestra parte, creamos objetos BEC mediante trampas de microchips. Era una coincidencia notable que nuestros grupos alcanzaran este descubrimiento, hacía tanto deseado, con sólo unos días de diferencia. Según Zimmermann (que también había sido colaborador de Hänsch, antes de irse a Tubinga), las ideas se "entrelazaron"; se refería al famoso fenómeno cuántico que correlaciona los resultados de experimentos incomunicados entre sí. Más de una docena de laboratorios de distintas partes del mundo utilizan ahora los chips para nubes atómicas en los experimentos sobre condensado de Bose-Einstein.

Con sólo dos o tres cables en una disposición muy sencilla, el chip para nubes atómicas básico crea ya una trampa magnética. Pero cabe conseguir mucho más gracias a otra ventaja del procedimiento, quizá la más importante: de sus precursores microelectrónicos el chip para nubes atómicas hereda las posibilidades que hoy ofrece la microfabricación. Podemos disponer los cables en cualquier esquema que deseemos, trazando curvas y trayectorias serpenteantes, incluso entrecruzamientos. Cuando las corrientes viajan por estos cableados, producen un paisaje magnético complejo que los átomos explorarán. Se abren así posibilidades fantásticas para la manipulación atómica.

Mi grupo de Múnich construyó una "cinta transportadora" de BEC con un chip cuya estructura iba bastante más allá de la de una trampa simple. Cuando las corrientes aplicadas a la variedad de cables se modulan de una manera apropiada, por la superficie del chip se mueve una serie de pozos de potencial. La regulación de las corrientes controla la velocidad del transporte y la distancia a la superficie. Se puede trasladar el condensado y colocarlo con una precisión de nanómetros, o milmillonésimas de metro. Esta cinta transportadora de BEC quizá se convierta en la espina dorsal de dispositivos más complejos, por ejemplo de computación cuántica; hablo de ello más abajo.

Pero el transportador de BEC no es más que un primer ejemplo. Apenas si se ha empezado a explorar las posibilidades que ofrece el moldeo del campo magnético.

Tubos magnéticos

Cuando el trazado del circuito consiste en dos o tres cables que funcionan en paralelo, el campo magnético crea una trampa tubular a lo largo de la cual los átomos se mueven libremente. El tubo magnético viene a ser para los átomos lo que una fibra óptica para la luz: una guía de ondas, de materia en este caso. Las ondas de luz se mueven en una fibra a lo largo de su eje, siguiendo su trayectoria y curvándose con ella. De manera semejante, el movimiento de un condensado a lo largo de una guía magnética de ondas de materia

ENFRIAR UN GAS DE ATOMOS

Los átomos de un gas caliente se comportan en muy buena medida como canicas: muy clásicos, no exhiben propiedades cuánticas. Pero a cada uno le corresponde un paquete de ondas cuántico de una cierta extensión. Para los átomos calientes, es minúscula, aunque crece a medida que se enfrían. Se forma un condensado de Bose-Einstein (BEC) cuando el gas es tan frío y denso, que los paquetes de ondas adquieren tal envergadura que se superponen. Todos los átomos se apilan entonces en el mismo estado cuántico: el mismo paquete de ondas. Ese paquete ondulatorio unificado en que se han fundido, es un condensado de Bose-Einstein.

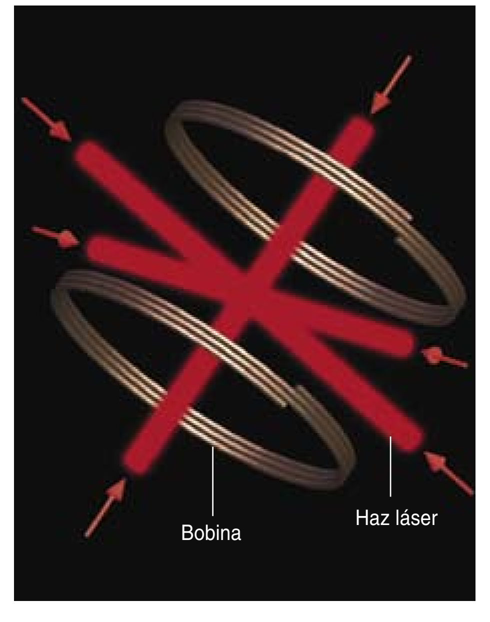
Producir un BEC precisa mucho equipamiento. El elemento central de un experimento de átomos fríos es una pequeña caja de cristal con algunas bobinas de cable a su alrededor. En esa celda se hace un vacío casi perfecto; se crea así, a todos los efectos, un termo de altísima calidad. Después, se introduce una reducida cantidad del gas que se desee. Seis rayos láser convergen en un punto del interior de la celda vacía. La luz láser no tiene que ser intensa. A menudo vale la de unos diodos láser baratos, parecidos a los que se emplean en los reproductores de discos compactos. A temperatura ambiente, los átomos del gas se mueven irregularmente por la celda, a una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora. Cuando entran en uno de los haces láser, la luz los enfría muy deprisa. Además, un campo magnético débil, producido por las bobinas de cable, colabora con la luz láser en impulsar los átomos hacia la intersección de los seis haces.

Esta combinación de la luz láser y del campo magnético, o trampa magnetoóptica (TMO), fue ideada en 1987 por Jean Dalibard, de la Escuela Normal Superior de París. David Pritchard, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Steven Chu, de la Universidad de Stanford, crearon la primera TMO real. Actualmente, la física de los átomos fríos se basa en este método; con él se enfrían gases de rubidio, sodio y muchas otras especies atómicas a temperaturas del orden del microkelvin. Con todo, una TMO logra sólo una densidad bastante baja; deja los átomos demasiado separados para que sus funciones de onda se superpongan. Para conseguir, al mismo tiempo, densidades más altas y temperaturas aún menores, se requiere otro mecanismo. Aquí es donde actúa el enfriamiento por evaporación.

El enfriamiento por evaporación funciona porque en cada instante hay partículas del gas casi en reposo, mientras otras llevan una velocidad bastante superior a la media. Cuando se extraen esos átomos rápidos, el gas que queda tiene una temperatura más baja. No se trata de una idea nueva: así se enfría una taza de café cuando se sopla sobre ella.

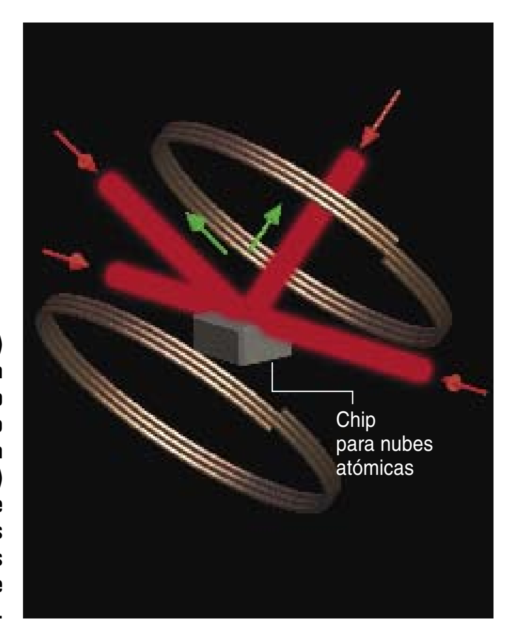
Sin embargo, aplicar el enfriamiento por evaporación a átomos ultrafríos requiere un equipo bastante refinado. En los experimentos de BEC, se realiza por lo general en una trampa magnética, una especie de cuenco profundo con paredes inmateriales. Los átomos más energéticos escapan de ese tazón. Se van reduciendo constantemente las paredes, de modo que los átomos calientes continúen escapando; el proceso de enfriamiento seguirá con los que queden.

Un elemento esencial del enfriamiento por evaporación es la redistribución de la energía de los átomos más lentos. Algunos acaban con velocidades más altas (y serán eliminados de la trampa a medida que continúe la evaporación); los demás llegarán a ser aún más lentos y fríos. Efectúan esta redistribución las colisiones “buenas” (las “malas”, con átomos circundantes, expulsan los átomos deseados fuera de la trampa). En esa fase es donde la trampa de microchip muestra sus ventajas: con corrientes pequeñas, produce campos intensos que comprimen los átomos más que las trampas ordinarias y aumenta así el ritmo de las colisiones buenas.



1. En la configuración ordinaria de una TMO (*izquierda*), seis rayos láser (*rojo*) se cruzan en el centro del campo magnético creado por dos bobinas. Pero si hay un chip en medio, interrumpirá, inevitablemente, uno o más de los haces.

2. La solución (*derecha*) consiste en aplicar una capa reflectante al chip y disparar sólo cuatro haces, en vez de seis. La reflexión (*flechas verdes*) en la capa reflectante proporciona los dos haces restantes. Los átomos fríos se recogen cerca de la superficie del chip.



KENN BROWN

constituye un haz de materia. Varios equipos de investigación han elaborado guías así (lo mismo en microchips que en sistemas mayores) y métodos para cargar átomos en ellas.

Se ha pensado sobre todo en su aplicación a la interferometría atómica. Cualquier clase de interferometría implica la combinación de dos ondas, que dará lugar a un patrón de luz con amplitudes altas y bajas, es decir, zonas iluminadas y zonas oscuras. La interferometría se suele realizar con rayos láser porque requiere una característica que la luz láser posee, la coherencia: a cada haz corresponde una onda, única y ordenada. Un BEC que viaja recuerda mucho a un rayo láser porque también es coherente. Al reunir dos haces atómicos coherentes se produce una interferencia: un patrón de puntos "brillantes" (muchos átomos) y "oscuros" (con pocos).

Los interferómetros atómicos han venido evolucionando desde hace diez años. Al principio no eran más que experimentos que probaban nociones teóricas; ahora, superan como sensores incluso a los mejores sistemas actuales (aunque quizá se requieran diez años más para que den el salto del laboratorio a su aplicación comercial). Su virtud más notable consiste en que miden la rotación y las variaciones locales de la gravedad, magnitudes necesarias para la navegación de barcos y aviones. Los aviones llevan interferómetros de fibra óptica ("giroscopios láser") para medir la rotación; es un suplemento imprescindible de la brújula tradicional. Los giroscopios basados en la interferometría atómica podrían ser varios órdenes de magnitud más precisos.

Quedan, no obstante, importantes problemas por resolver. Uno de ellos, el desarrollo de desdobladores coherentes de haces que dividan el haz de átomos en dos. Son una de las piezas principales del funcionamiento de cualquier interferómetro. Para que el desdoblador sea coherente, cada átomo, como una especie de gato de Schrödinger, debe encontrarse en ambas trayectorias de desdoblamiento del haz a la vez (el desdoblador divide en dos la función de ondas cuántica del átomo). En contraste, los desdobladores de haz con chips que se han construido hasta ahora se parecen más a las mangueras de incendios: dispersan el haz con demasiada brusquedad y cada átomo marcha a la izquierda o a la derecha, en vez de ir por ambas direcciones a la vez. Estos dispositivos "incoherentes" no valen para un interferómetro.

Problemas pendientes

En julio de 2004, el grupo de Eric A. Cornell, de la Universidad de Colorado en Boulder, y el de Mara Prentiss, de la Universidad de Harvard, presentaron un ingenioso interferómetro atómico de láser. Crearon un condensado de Bose-Einstein en un chip para nubes atómicas y con un pulso del láser lo separaron en dos partes coherentes que se alejaban entre sí. Pulsos adicionales unían de nuevo las dos partes para producir la interferencia.

Los desdobladores de haz no son el único tipo de dispositivo que presenta problemas cuando hay que manejar ondas de materia. En 2002, el grupo de Zimmermann y el de David Pritchard (uno de los inventores de la interferometría atómica), del Instituto de Tecnología de Massachusetts, hallaron un efecto inesperado cuando soltaron un condensado en una guía de ondas de chip. En vez de que el condensado se extendiese y llenara la guía hasta su extremo, como haría el agua en un canal horizontal largo, se paró tras haber empezado a expandirse y se fragmentó. Estas pequeñas salpicaduras de materia habían quedado atrapadas por unas ondulaciones muy pequeñas de la guía magnética.

En marzo de 2004, Alain Aspect y sus colaboradores del Instituto de Optica de Orsay demostraron con microscopía electrónica de barrido y un análisis elegante que las pequeñas desviaciones de su forma recta ideal, por los cables, constituía la causa de las ondulaciones de la guía de ondas magnética. Las minúsculas desigualdades del cable bastan para que la corriente describa pequeñas curvas que distorsionan el campo magnético. Las sondas de campo magnético corrientes no habían medido nunca estas imperfecciones del campo magnético. Los átomos del BEC fueron sondas mucho más sensibles.

Otro problema afecta a aspectos mucho más fundamentales. En los experimentos realizados hasta ahora, los átomos del condensado de Bose-Einstein están, por lo menos, a diez micras de la superficie del chip. El carácter cuántico de los átomos se manifestaría de modo más pronunciado en trampas aún menores, pero ese empequeñecimiento de las trampas magnéticas aproximaría más los átomos a la superficie del chip. A esas minúsculas distancias —menos de una micra—, los átomos interaccionarían sin remedio con la superficie por medio de la fuerza de Casimir-Polder. En un experimento realizado a finales de 2003 por Vladan Vuletic, del MIT, se observó que, al acercarse a menos de alrededor de 1,5 micras de una superficie no conductora, la trampa perdía átomos.

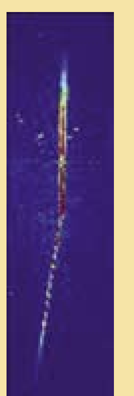
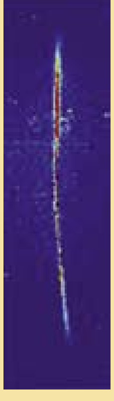
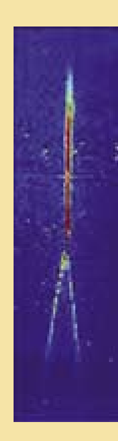
Finalmente, otro efecto que se debe considerar en trampas menores es el magnetismo térmico de la superficie del chip. Imaginemos un conjunto desordenado de pequeños imanes en movimiento constante y caótico. A temperatura ambiente y a distancias inferiores a la micra, un metal viene a ser eso. A distancias mayores, el promedio de todas las contribuciones se anula; de ahí que no se las haya visto hasta ahora. Sin embargo, cuando los átomos están muy cerca de la superficie, demuestran de nuevo que constituyen sondas de fina sensibilidad. El magnetismo térmico sacude y mueve la trampa magnética. Al cabo de un tiempo, los átomos son expulsados. Lo predijo en 1999 Carsten Henkel, de la Universidad de Potsdam, y lo verificó experimentalmente, en 2003, Ed A. Hinds, ahora en el Colegio Imperial de Londres, quien antes había atrapado átomos fríos con otro medio poco corriente: una cinta de vídeo.

Para los usos donde el magnetismo térmico suponga un problema, hay varias soluciones. El chip se puede enfriar con nitrógeno líquido, o incluso con helio líquido, pero entonces hay que añadir complejidad al aparato instrumental. Según lo predicho por Henkel y corroborado en 2003 por el equipo de Cornell, el magnetismo térmico es más débil en metales de alta resistividad. Emplear titanio en vez de cobre u oro reduce las pérdidas.

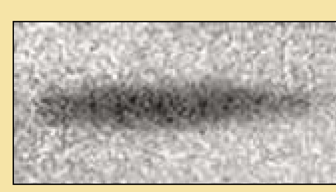
Las guías de ondas, y sus aplicaciones en los interferómetros atómicos, explotan un aspecto particular

DIFICULTADES QUE HAY QUE SUPERAR

Las ondas de materia son viajeras exigentes. Antes de que los chips para nubes atómicas lleguen a encontrar alguna aplicación práctica, hay que resolver ciertos problemas.

Cuando un desdoblador de haces atómicos es "incoherente", al dividir el haz cada átomo va por la izquierda o por la derecha. Con la mirada puesta en la interferometría atómica, se está buscando una versión coherente en la que cada átomo vaya por la izquierda y por la derecha a la vez. En las imágenes de la izquierda vemos cómo canaliza un desdoblador de haces incoherente el flujo de átomos de litio a través de una Y invertida.

La fragmentación de una nube de átomos atrapada en el campo magnético de un cable de un chip indica que el potencial magnético presenta irregularidades (*izquierda*). Las desigualdades de la guía de ondas magnética están causadas por la rugosidad microscópica de los cables. Cuando una trampa óptica, donde no interviene el cable del chip, atrapa en el mismo punto una nube atómica, no se producen fragmentaciones (*derecha*).

JÖRG SCHMIEDMAYER (*izquierda*); WOLFGANG KETTERLE *MIT* (*derecha*)

de la naturaleza mecanocuántica del átomo: su carácter ondulatorio. Otras manifestaciones cuánticas pueden conducir a otras aplicaciones, aún más revolucionarias. La estrella del panorama cuántico es el computador cuántico [*véase* "Reglas para un mundo cuántico complejo", por Michael A. Nielsen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2003]. Este futuro dispositivo sacaría partido del principio de superposición (otra característica peculiar del mundo cuántico) para efectuar ciertos tipos de cómputo mucho más deprisa que cualquier ordenador clásico. Un computador cuántico procesa qubits, los equivalentes cuánticos de los bits. Un bit lógico ordinario, clásico (no cuántico), sólo puede ser verdadero o falso, 1 o 0. El qubit, por el contrario, puede hallarse en un estado de superposición que corresponda a cualquier mezcla de verdadero y falso, como el gato de Schrödinger en su combinación de vivo y muerto.

En un computador clásico, los cálculos que corresponden a distintos estados de los bits se deben realizar uno después del otro; con los qubits, al mismo tiempo. Se ha demostrado que, para ciertos problemas, esta característica permite a los ordenadores cuánticos resolver problemas a velocidades que jamás podrán alcanzar los clásicos.

Hoy, los físicos cuánticos dedican particular empeño a pensar en maneras prácticas de construir un computador cuántico: con iones atrapados, con grandes moléculas, con espines de electrones..., o quizá con BEC en chips para nubes atómicas. La idea resulta sumamente atractiva: un tal chip cuántico guarda un muy conveniente parecido con un chip microelectrónico tradicional y, sin embargo, es nuevo de raíz. El transportador de átomos serviría para juntar qubits de modo que interaccionasen de una manera controlable.

Los condensados sobre chips son el principio de una historia. Como tan a menudo ocurre en la ciencia, el devenir no está escrito. Al igual que en el pasado, saltarán sorpresas, agradables y desagradables. Algunos obstáculos se eliminarán; otros forzarán a los investigadores a cambiar de dirección. Pero, en cualquier caso, el mundo cuántico seguirá acercándose al clásico.

El autor

Jakob Reichel obtuvo su doctorado en la Escuela Normal Superior (ENS) de París. Volvió a su Alemania natal en 1997 para trabajar en el Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching, y en la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich. En 2004 recibió el premio europeo de investigadores jóvenes y aceptó una plaza en la ENS.

Bibliografía complementaria

MAGNETIC CHIPS AND QUANTUM CIRCUITS FOR ATOMS. E. Hinds en *Physics World*, vol. 14, n.º 7, páginas 39-44; julio 2001.

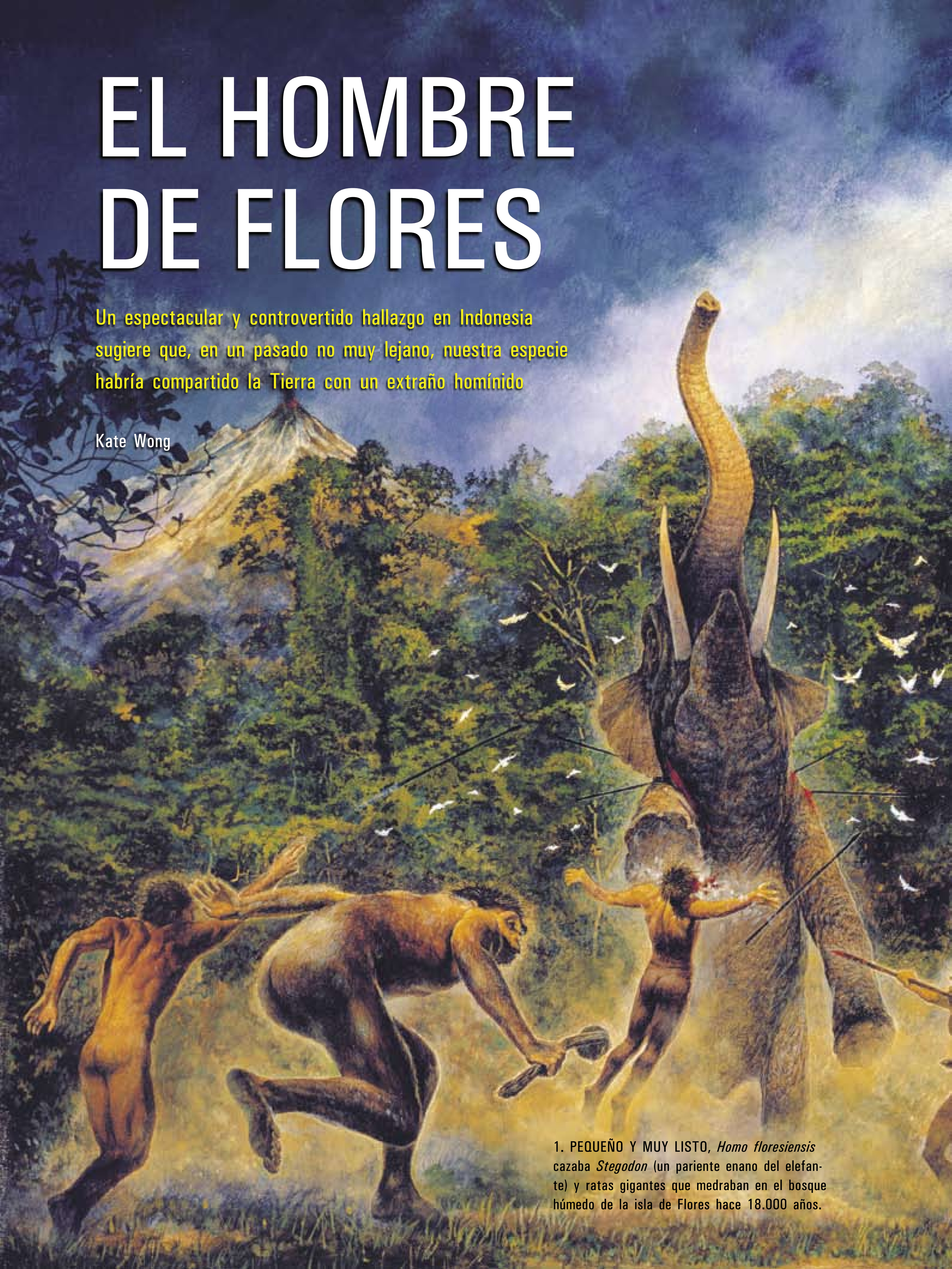
SPECIAL SECTION ON ULTRACOLD MATTER. *Nature*, vol. 416, n.º 6877, páginas 205-246; 14 de marzo, 2002.

COHERENCE WITH ATOMS. Mark A. Kasevich en *Science*, vol. 298, n.º 5597, páginas 1363-1368; 15 de noviembre, 2002.

EL HOMBRE DE FLORES

Un espectacular y controvertido hallazgo en Indonesia sugiere que, en un pasado no muy lejano, nuestra especie habría compartido la Tierra con un extraño homínido

Kate Wong



1. PEQUEÑO Y MUY LISTO, *Homo floresiensis* cazaba *Stegodon* (un pariente enano del elefante) y ratas gigantes que medraban en el bosque húmedo de la isla de Flores hace 18.000 años.



KAZUHIKO SANO

En la isla indonesia de Flores todavía hoy se oye hablar de la legendaria *ebu gogo* ("la abuela que todo lo come"), una diminuta criatura de apetito voraz, postura erguida y andar titubeante, de lenguaje susurrante. Siempre se había creído que los macacos habían inspirado la leyenda. Pero en octubre de 2004 salió a la luz otra posible explicación. Un equipo de investigadores australianos e indonesios que excavaban en una cueva de la isla hallaron los restos de un humano liliputiense —apenas alcanzaba un metro de estatura— que vivió hasta hace escasos 13.000 años.

La noticia conmocionó a los paleoantropólogos de los cuatro puntos cardinales. Creíase que, tras la extinción de los neandertales en Europa y de *Homo erectus* en Asia, *Homo sapiens* había sido el único habitante homínido de la Tierra durante los últimos 25.000 años. Además, todos los fósiles de homínidos de pequeñas dimensiones que se habían encontrado hasta entonces pertenecían a australopitecinos (Lucy y similares) de tres millones de años de antigüedad, es decir, muy anteriores a la aparición de *Homo sapiens*. Nadie imaginaba que nuestra especie hubiera compartido el planeta con tan diminuto compañero, ni tampoco que una criatura con el cerebro del tamaño de un pomelo pudiera haber desarrollado capacidades cognitivas equiparables a las del hombre moderno.

Flores: un pozo de sorpresas

No era el primer tesoro paleoantropológico que se desenterraba en Flores. En 1998, un equipo de arqueólogos dirigido por Michael J. Morwood, de la Universidad de Nueva Inglaterra en Armidale, publicó el hallazgo de unos instrumentos líticos de 840.000 años de antigüedad encontrados en la depresión de Soa, en la región central de la isla. Aunque no apareció ningún fósil humano junto a útiles, el descubrimiento ponía de manifiesto que *Homo erectus*, el único homínido conocido en el sudeste asiático en aquella época, había cruzado el estrecho de aguas profundas que separa de Java la isla de Flores.

El hallazgo causó mayor sorpresa porque nunca antes se habían encontrado indicios de que *Homo erectus* hubiese sido capaz de construir embarcaciones. De hecho, la fecha más antigua aceptada para la aparición de la navegación era de entre 60.000 y 40.000 años, cuando nuestra especie colonizó Australia. (El resto de la fauna que medraba en Flores debió llegar hasta allí nadando o sobre troncos y ramas flotantes.) Los humanos no son tan buenos nadadores como para atravesar ese estrecho, por lo que algunos sostienen que pudieron cruzarlo mediante balsas naturales.

Con la esperanza de documentar períodos subsiguientes de ocupación humana, Morwood y Radien P. Soejono, del Centro de Arqueología de Yakarta, centraron su atención en Liang Bua, una gran cueva caliza del oeste de Flores. Desde los años setenta, diversos arqueólogos indonesios habían venido excavando el yacimiento de forma intermitente, siempre condicionados por la disponibilidad



ELEFANTE INDIO ACTUAL
(*Elephas maximus*)

Resumen/*Humanos empequeñecidos*

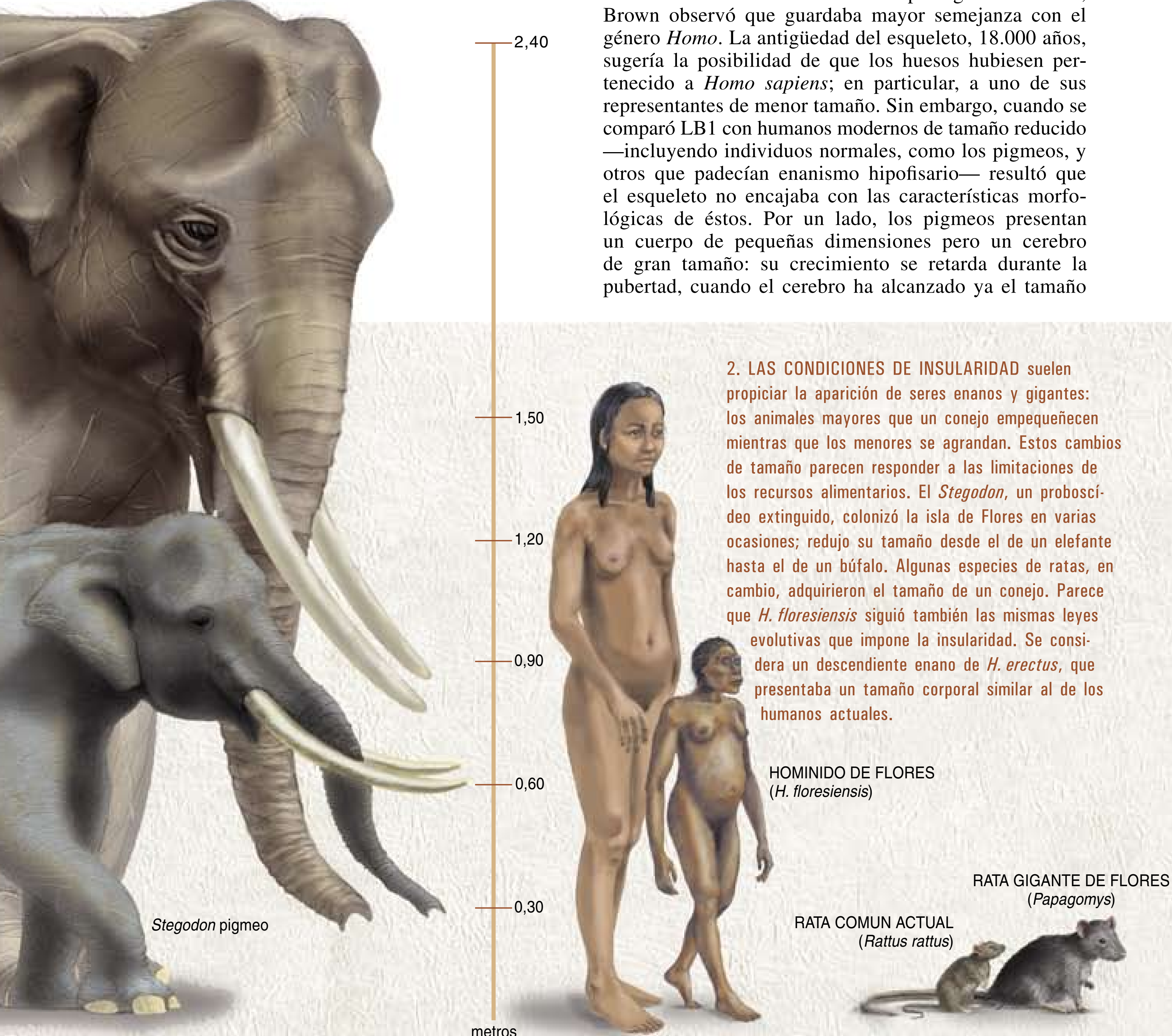
- De acuerdo con la doctrina admitida, *Homo sapiens* habría sido el único homínido que habitó el planeta durante los últimos 25.000 años. Pero los restos descubiertos en la isla indonesia de Flores, pertenecientes a una especie enana de *Homo* que vivió hasta hace 13.000 años, ponen esa hipótesis en un aprieto.
- Aunque semejante a los primeros homínidos, en cuanto a las reducidas dimensiones corporales y cerebrales, parece que esta nueva especie fabricó útiles líticos complejos. Ello plantea toda una suerte de preguntas sobre la relación entre el tamaño cerebral y la inteligencia.
- Amén de espectacular, este hallazgo ha resultado controvertido. Algunos expertos cuestionan la diagnosis de los huesos. Además, los autores de tales artefactos depurados pudieron haber sido humanos modernos.

de financiación; pero sólo habían excavado los niveles superiores. Morwood y Soejono se propusieron alcanzar la roca madre. Empezaron las excavaciones en julio del 2001. En poco tiempo, recuperaron abundantes utensilios líticos y huesos de *Stegodon*, una forma enana de un pariente extinto del elefante moderno.

Hasta el final de la tercera campaña de excavación no apareció el primer diente aislado perteneciente a un homínido. Morwood llevó consigo una réplica del mismo a Armidale para mostrárselo a su compañero Peter Brown. El premolar presentaba una forma humana, pero no pertenecía a un humano actual. Siete días más tarde, Morwood recibía la noticia de que el equipo indonesio había descubierto un esqueleto. El y Brown tomaron el primer vuelo hacia Yakarta.

Aunque la extraña morfología del molar vaticinaba hallazgos novedosos, a todos cogió desprevenidos la aparición del esqueleto, al que casi sólo le faltaban los brazos. A tenor de la anatomía pélvica, correspondía a un individuo bípedo, probablemente una hembra. La erupción y el desgaste dentarios indicaban que se trataba de un adulto. Su estatura, en cambio, era similar a la de un niño actual de unos tres años de edad. Presentaba varios rasgos primitivos: pelvis ancha, cuello del fémur largo y un tamaño cerebral tan reducido como el del australopitecino con el menor cerebro conocido. No obstante, en otros aspectos su morfología resultaba familiar: la dentición pequeña, la nariz estrecha, la forma general del cráneo y el grosor de los huesos craneales evocaban el género *Homo*.

Brown pasó los tres meses siguientes analizando el enigmático esqueleto. Le correspondió la catalogación LB1. No resultó tarea fácil acomodarlo en una clasificación científica. En un principio, las características que LB1 compartía con los primeros homínidos como los australopitecinos apuntaban a un nuevo género de la familia de los homínidos. Pero al proseguir el estudio, Brown observó que guardaba mayor semejanza con el género *Homo*. La antigüedad del esqueleto, 18.000 años, sugería la posibilidad de que los huesos hubiesen pertenecido a *Homo sapiens*; en particular, a uno de sus representantes de menor tamaño. Sin embargo, cuando se comparó LB1 con humanos modernos de tamaño reducido —incluyendo individuos normales, como los pigmeos, y otros que padecían enanismo hipofisario— resultó que el esqueleto no encajaba con las características morfológicas de éstos. Por un lado, los pigmeos presentan un cuerpo de pequeñas dimensiones pero un cerebro de gran tamaño: su crecimiento se retarda durante la pubertad, cuando el cerebro ha alcanzado ya el tamaño



2. LAS CONDICIONES DE INSULARIDAD suelen propiciar la aparición de seres enanos y gigantes: los animales mayores que un conejo empequeñecen mientras que los menores se agrandan. Estos cambios de tamaño parecen responder a las limitaciones de los recursos alimentarios. El *Stegodon*, un proboscídeo extinguido, colonizó la isla de Flores en varias ocasiones; redujo su tamaño desde el de un elefante hasta el de un búfalo. Algunas especies de ratas, en cambio, adquirieron el tamaño de un conejo. Parece que *H. floresiensis* siguió también las mismas leyes evolutivas que impone la insularidad. Se considera un descendiente enano de *H. erectus*, que presentaba un tamaño corporal similar al de los humanos actuales.



3. LAS SEMEJANZAS ENTRE LB1 y otros miembros de nuestro género han conducido a clasificar el homínido de Flores dentro del género *Homo*, a pesar de su reducido cerebro. En razón de su estrecho parecido con *H. erectus*, LB1 se considera perteneciente a una nueva especie: *Homo floresiensis*, un descendiente de *H. erectus* que habría menguado su tamaño. *H. floresiensis* se distingue de *H. sapiens* en que muestra, entre otras características, ausencia de mentón, prognatismo facial, un toro supraorbitario más marcado y una bóveda craneal más baja.

CHRISTIAN SIDOR *Escuela de Medicina Osteopática de Nueva York (H. sapiens)*; PETER BROWN *Universidad de Nueva Inglaterra, Armidale* Y TIMEFORKIDS/KRT *(H. floresiensis)*; DAVID BRILL *(H. erectus)*

adulto. Por otro, los individuos con trastornos genéticos que provocan una corta estatura y un cerebro pequeño muestran varios rasgos que no se observan en LB1 y raramente alcanzan la edad adulta. Además, el esqueleto de Flores mostraba rasgos arcaicos nunca hallados en un *Homo sapiens* que presentara un tamaño reducido por alteraciones genéticas.

La descripción que mejor se ajustaba a LB1, pues, era la de un *Homo erectus* en miniatura. Asignaron el esqueleto, así como el diente aislado y un hueso del brazo recuperados en niveles más antiguos, a una nueva especie humana, *Homo floresiensis*, descendiente de *Homo erectus*; tras quedar aislado en Flores, *H. erectus* habría evolucionado en condiciones de insularidad hasta convertirse en una especie diminuta, lo mismo que le habría sucedido a la versión enana de *Stegodon*.

Los mamíferos mayores que los conejos, enseña la biología, tienden a reducir su tamaño cuando habitan islas pequeñas, presumiblemente para adaptarse a la escasez de recursos alimentarios. No hay en ello nada que perder, pues esos lugares albergan pocos depredadores. Los únicos predadores de gran tamaño que medraban en Flores eran el dragón de Komodo y otro lagarto mayor. Los animales menores que los conejos, en cambio, muestran una tendencia al gigantismo, quizá porque un cuerpo de mayores dimensiones resulta más eficiente, desde el punto de vista energético, que otro menor. Abona esta hipótesis el hallazgo, en Liang Bua, de fósiles de una rata con las proporciones de una liebre.

No obstante, era la primera vez que las leyes evolutivas de la insularidad se utilizaban para explicar la talla reducida de un homínido. En su mayoría, los paleoantropólogos sostienen que los humanos hemos logrado escapar de numerosas presiones de la selección natural, a las que otros animales deben adaptarse, merced a la cultura. Para enfrentarnos al frío, por ejemplo, no desarrollamos ningún pelaje, sino que nos calentamos con fuego y nos abrigamos con ropa. El descubrimiento de una especie de homínido enano indica que, ante determinadas circunstancias, los humanos evolucionan de la misma forma predecible en que lo hacen los mamíferos de gran tamaño cuando el ambiente se torna hostil. Según Richard Potts, de la Institución Smithsoniana, el pequeño cráneo de *H. erectus* que su grupo halló en 2004 en el yacimiento keniata de Olorgesaile ofrece otra prueba de que *Homo* habría solventado una escasez de recursos mediante la reducción de tamaño. En su opinión, "empequeñecer" constituye una de las herramientas biológicas de las que los homínidos estaban dotados; los fósiles hallados en Flores ofrecerían un ejemplo extremo de ello.

Tamaño cerebral y desarrollo cultural

El diminuto cerebro de *Homo floresiensis* causó mayor desconcierto. No menos sorprendente resultaba lo que este homínido era capaz de hacer con un cerebro de tan modestas dimensiones. El engrandecimiento del cerebro constituye uno de los distintivos de la evolución humana. En el transcurso de seis o siete millones de años, nuestros

antepasados triplicaron la capacidad craneana: desde los 360 centímetros cúbicos de *Sahelanthropus* —el homínido más antiguo conocido— hasta los 1350 centímetros cúbicos (en promedio) de los humanos modernos. Los datos arqueológicos indican que la complejidad cultural aumentó de forma paralela.

En opinión de los expertos, pues, un gran cerebro constituía un requisito para desarrollar una cultura avanzada. Pero mientras los australopitecinos, de cerebro pequeño, construían sólo útiles de piedra rudimentarios, *H. floresiensis*, con un tamaño cerebral semejante, parece que fabricó una serie de utensilios cuyo nivel de complejidad hasta ahora sólo se había observado en *H. sapiens*.

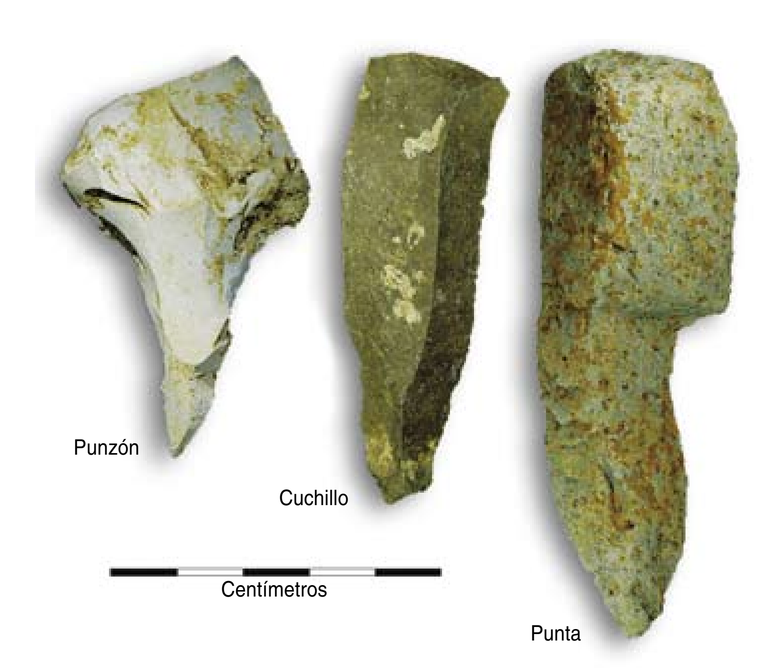
La mayoría de los artefactos de Liang Bua corresponden a simples lascas obtenidas al golpear rocas volcánicas y sílex, de elaboración similar a las lascas fabricadas por los últimos australopitecinos o los primeros representantes del género *Homo*. Pero, mezclados con los restos de un *Stegodon* enano, los arqueólogos encontraron útiles más depurados: puntas delicadamente talladas, grandes cuchillos, punzones y pequeñas lascas que podrían haberse enmangado para fabricar lanzas, entre otros. Parece, pues, que los *Stegodon* eran presas habituales de *H. floresiensis*. Un número importante de huesos de *Stegodon* pertenecen a individuos juveniles, que pudieron ser abatidos por un solo *H. floresiensis*. Otros, sin embargo, pertenecen a individuos adultos de alrededor de media tonelada, cuya caza y transporte requerían la coordinación de un grupo de *H. floresiensis* e incluso, según sostiene Richard G. Roberts, de la Universidad de Wollongong, el uso de un lenguaje.

La presencia de huesos carbonizados de animales indica que el repertorio cultural de *H. floresiensis* incluía también la cocina. El hecho de que este homínido con un cerebro de reducidas dimensiones pudiese controlar el fuego reviste suma importancia. Se daba por cierto que los humanos no habían conseguido dominar al fuego hasta una etapa reciente de nuestro desarrollo cognitivo; de hecho, la primera prueba inequívoca del uso del fuego procede de hogares europeos de 200.000 años de antigüedad: se le atribuía, pues, a los neandertales, que estaban dotados de un cerebro poderoso.

Si las hipótesis sobre *H. floresiensis* avanzadas por sus descubridores se confirman, los restos de Flores constituirán uno de los principales hallazgos de los últimos decenios de la paleoantropología. No sólo probarían que una segunda especie de humano coexistió con nuestros ancestros directos en un pasado no muy lejano y que nuestro género presenta mayor diversidad de lo que se pensaba, sino que también plantearían una batería de preguntas acerca de la relación entre tamaño cerebral e inteligencia. (No resulta extraño, pues, que el descubrimiento haya generado polémica.)

Clasificación biológica

Las teorías alternativas a la del equipo descubridor no tardaron en llegar. En una carta aparecida el 31 del pasado octubre en la edición australiana del *Sunday Mail* —apenas tres días después de la publicación del hallazgo en *Nature*—, Maciej Henneberg, de la Universidad de Adelaida, replicó que una patología denominada microcefalia podía explicar los peculiares rasgos de LB1. Los individuos que padecen enanismo microcefálico esencial, la forma más grave de microcefalia congénita, mueren durante la infancia. Sin embargo, aquellos que sufren alguna forma menos grave, si bien padecen cierto retraso mental, sobreviven hasta alcanzar la edad adulta.



4. UTILES AVANZADOS que podrían haber sido obra de *H. floresiensis*. Los primeros homínidos, con un tamaño cerebral similar al del hombre de Flores, eran capaces de tallar sólo simples lascas de piedra. Sin embargo, en los mismos niveles estratigráficos donde aparecieron los fósiles homínidos de la cueva Liang Bua, se descubrieron punzones, cuchillos, puntas y otros instrumentos elaborados. Estos útiles entrañan un nivel de complejidad cultural que hasta ahora sólo se atribuía a *H. sapiens*.

CORTESIA DE MARK MOORE

Henneberg comparó las dimensiones craneales y faciales de LB1 con las del cráneo de 4000 años de antigüedad hallado en Creta, perteneciente a un individuo microcefálico. No observó diferencias significativas. Henneberg aducía, además, que el hueso de antebrazo aparecido en un nivel estratigráfico más profundo de la misma cueva no perteneció a un enano sino a un individuo de entre 151 y 162 centímetros de estatura, la misma altura que hoy muestran un gran número de mujeres y algunos varones, señal de que vivieron también en Liang Bua individuos con una estatura similar a la nuestra. Según Henneberg, pues, LB1 no perteneció a una nueva especie del género *Homo*, sino a un *H. sapiens* microcefálico.

Susan C. Antón, de la Universidad de Nueva York, no comparte esta opinión. Sostiene que los humanos modernos microcefálicos presentan una morfología facial completamente diferente en un cuerpo de tamaño normal, no menguado. No cree, sin embargo, que el hombre de Flores represente una nueva especie de homínido. Las diferencias morfológicas que éste muestra respecto a *Homo erectus* son escasas, harto menores que las existentes entre un perro chihuahua y un gran danés. Según Antón, LB1 podría corresponder a un *Homo erectus*

que sufrió algún tipo de alteración en su crecimiento, provocada por la microcefalia o por malnutrición.

Otros expertos afirman que el homínido de Flores presenta una anatomía todavía más primitiva. Según Colin P. Groves, de la Universidad Nacional de Australia, y David W. Cameron, de la Universidad de Sydney, el tamaño cerebral, el largo cuello del fémur y otros rasgos indican mayor proximidad filogenética con *Homo habilis* que con *Homo erectus*, este segundo una especie mucho más evolucionada. (Se considera que *Homo habilis* es el miembro más antiguo de nuestro género.)

Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, se pregunta si los restos de Flores no se deberían adscribir a una rama brotada del tronco de *Australopithecus*. Si LB1 descendiera de *H. sapiens* o de *H. erectus*, ¿por qué la selección natural habría empequeñecido ese cerebro hasta alcanzar un tamaño incluso menor que el que le corresponde según su estatura? El mismo Wolpoff admite que en su propuesta también queda algún cabo suelto: si LB1 descendiera de *Australopithecus*, dotado de mandíbulas robustas y dientes grandes, ¿cómo se explica que el homínido de Flores presente una mandíbula y una dentición tan delicadas? Sin embargo, considera que este problema evolutivo entraña menor dificultad que el planteado por la disminución del tamaño cerebral; después de todo, un cambio en la dieta puede provocar una reducción en el aparato de masticación, pero, ¿por qué la evolución habría conducido a una reducción de la base de la inteligencia?

Hallar un australopitecino que viviera fuera de Africa —por no decir en el sureste asiático— hace unos 18.000 años abonaría la hipótesis anterior. Se suponía que este grupo se extinguió en Africa hace un millón y medio de años, sin haber abandonado nunca su continente natal. Ello se explicaba suponiendo que quizá los homínidos necesitaron desarrollar extremidades largas —que permitieran avanzar a grandes zancadas—, cerebro de gran tamaño y técnicas más depuradas antes de poder aventurarse a explorar el resto del Mundo Antiguo. Pero el reciente hallazgo del fósil de un *Homo* de 1,8 millones de años de antigüedad en el yacimiento de Dmanisi, en la República de Georgia, refuta esta explicación: los homínidos georgianos eran primitivos, de tamaño reducido y utilizaban útiles como los que los australopitecinos habían fabricado un millón de años antes. Por tanto, no existe razón a priori para pensar que los australopitecinos (o incluso *H. habilis*) no colonizaron otros continentes.

Pero si los *Australopithecus* salieron de Africa y pervivieron en Flores hasta hace poco tiempo, tendríamos que preguntarnos por qué no aparecen más fósiles que apoyen esta hipótesis. Según Wolpoff, puede que éstos ya se hayan encontrado. En los años cuarenta del siglo pasado se hallaron en Indonesia un conjunto de restos que han sido clasificados por diversos autores como *Australopithecus*, *Meganthropus* y, más recientemente, *H. erectus*. Ahora deberían ser reexaminados a la luz de los nuevos fósiles humanos de Flores.

Numerosos expertos ajenos al proyecto de Flores respaldan la clasificación taxonómica establecida por Brown y Morwood. Según David R. Begun, de la Universidad de Toronto, la mayoría de las diferencias entre el homínido de Flores y otros miembros del género *Homo*, así como las aparentes semejanzas con los australopitecinos, están relacionadas con su menguada masa corporal. Es decir, a medida que la población de la isla de Flores empequeñeció sus medidas corporales desde un antepasado *H. erectus*, algunos de sus rasgos convergieron hacia el reducido tamaño de los australopitecinos. Puesto que LB1 comparte algunos rasgos clave con *H. erectus* y otros con otros miembros del género *Homo*, la opción más sencilla es clasificarlo como una nueva especie de *Homo*.

MIGRACIONES PREHISTORICAS



Descubrir que *H. erectus* pudo haber sobrevivido en la isla de Java hasta hace unos 25.000 años causó, hace un decenio, mayor sorpresa en la comunidad científica; su extinción sería posterior a la llegada de *H. sapiens* a esa región e incluso posterior a la extinción de los neandertales en Europa. El reciente hallazgo de una tercera especie de homínido, *H. floresiensis*, que vivió en Flores hasta hace sólo 13.000 años ha resultado todavía más sorprendente.

Los restos se hallaron en Liang Bua, una gran cueva del oeste de la isla. Todavía no se conoce cómo llegaron a Flores los primeros homínidos. Podrían haber atravesado el mar con la ayuda de una embarcación o quizás aprovechando la deriva de una balsa natural.

Por su situación geográfica, *H. erectus* de Java constituye un buen candidato para ser el antepasado de *H. floresiensis*. Sin embargo, las semejanzas con los fósiles hallados en Africa y en la República de Georgia sugieren que *H. floresiensis* podría descender de otra migración homínida hacia el sudeste asiático, distinta de la que dio lugar al *H. erectus* de Java. Futuras campañas de excavación en Flores y otras islas indonesias quizás arrojen luz sobre estas cuestiones.



HANDOUT/REUTERS/CORBIS (*cueva*); LAURIE GRACE Y EDWARD BELL (*mapas*)

Lo mismo opina G. Philip Rightmire, de la Universidad de Binghamtom; según este especialista en evolución de *H. erectus*, el caso de *Homo floresiensis* respondería a un experimento evolutivo circunscrito.

Cultura técnica

Aún más polémica que la posición dentro del árbol evolutivo de los homínidos resulta la afirmación de que el hombre de Flores era capaz de fabricar útiles líticos refinados. Richard Klein, de la Universidad de Stanford, subraya que de los artefactos trabajados y hallados en la cueva había muy pocos, si es que los había, cerca del esqueleto LB1. ¿Podría ser que éstos fueran obra de humanos modernos, que hubiesen ocupado la cueva en otro momento? En la opinión de Klein, las excavaciones deben proseguir para determinar la relación estratigráfica entre los utensilios líticos y los fósiles humanos. En el caso de que aparecieran restos de homínidos actuales, quedaría por aclarar si en la cueva coexistieron dos especies diferentes o sólo vivieron humanos modernos y, por tanto,

LB1 corresponde simplemente a un humano moderno que padeció alguna anomalía en su desarrollo.

Dejando a un lado los problemas estratigráficos, Groves sostiene que los instrumentos líticos parecen demasiado avanzados para haber sido manufacturados por un homínido primitivo y diminuto. Para el equipo descubridor es improbable que los instrumentos sean obra de *Homo sapiens*, porque algunos de ellos tienen 94.000 años de antigüedad. Pero Groves señala que se han encontrado instrumentos de 67.000 años de antigüedad en Liujang (China) y que quizás aparezcan otros aún más antiguos que indiquen la presencia de nuestra especie durante esa época en Extremo Oriente.

Según Bernard Word, de la Universidad George Washington, todavía no contamos con suficientes pruebas para asegurar que *H. floresiensis* fue el autor de una industria lítica tan depurada. Pero aunque lo fuera, ¿cómo explicaríamos la relación entre el tamaño cerebral y las capacidades cognitivas? Si un homínido dotado de un cerebro no mucho mayor que el de un chimpancé pudo desarrollar una cultura material tan compleja, ¿por qué tardó tanto en aparecer la técnica lítica?

Rightmire concluye que, si *H. floresiensis* fabricaba útiles avanzados, deberíamos admitir que el tamaño del cerebro no importa demasiado. De hecho, el volumen cerebral de los humanos actuales presenta una extensa variabilidad, con eximios pensadores en ambos extremos del espectro: Jacques Anatole François Thibault (Anatole France), ganador del premio Nobel de literatura en 1921, contaba con una capacidad craneana de sólo unos 1000 centímetros cúbicos; la del general inglés Oliver Cromwell doblaba ese volumen. Para Potts, esto significa que no importa tanto el tamaño cuanto la estructura reticular establecida.

Para nuestro infortunio, el cerebro de LB1 desapareció hace largo tiempo. Nunca conoceremos su organización interna. Con todo, la superficie interna de la caja craneana ofrece algunas pistas. A partir de las impresiones endocraneales, los paleontólogos extraen moldes de látex; éstos se utilizan luego para obtener réplicas que muestran la morfología del cerebro. En el caso de LB1, los huesos son demasiado frágiles para soportar el proceso de moldeado. En su defecto, el equipo de Brown se propone obtener una reproducción virtual a partir de la tomografía computarizada, para después generar una réplica física mediante estereolitografía.

A Dean Falk, de la Universidad de Florida, le sorprendería sobremanera que el cerebro de *H. floresiensis* resultara una versión en miniatura del cerebro humano moderno. ¿Y si presentara circunvoluciones similares a las del cerebro del chimpancé? Los expertos llevan largo tiempo discutiendo si los pliegues de los cerebros de gran tamaño son una simple consecuencia de sus dimensiones o si la reorganización refleja un proceso de selección en pro de una mayor capacidad cognitiva. Quizá LB1 arroje luz sobre esta cuestión.

De vuelta al mundo perdido

En Liang Bua se han descubierto también los restos de otros cinco individuos que encajan con la anatomía de *H. floresiensis*. Ninguno de ellos es tan completo como LB1, cuyos brazos aparecieron en la última campaña de excavación. Asimismo, han desenterrado una segunda mandíbula, idéntica en tamaño y morfología a la de LB1. La duplicación de huesos fósiles refuerza la idea que defiende la existencia de una población de estos diminutos humanos. Al propio tiempo, descartaría la posibilidad de que LB1 correspondiera a un individuo afectado por alguna patología.

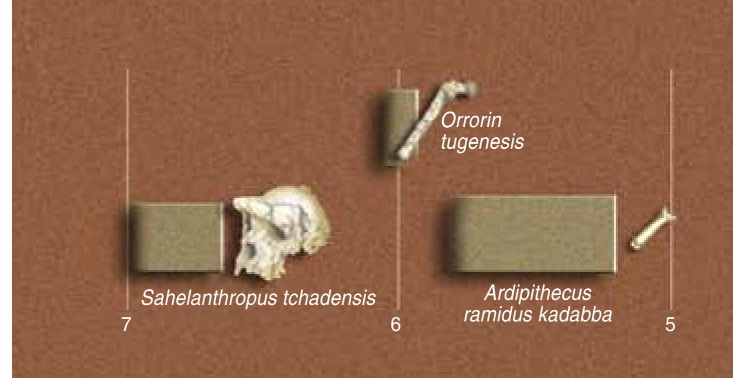
Quizás el ADN ayude a desentrañar el enigma. En la Universidad de Oxford se está llevando a cabo el análisis genético de muestras de pelos que posiblemente pertenecieron a *H. floresiensis*. Huesos y dientes podrían conservar fragmentos de ADN válido. Aunque las probabilidades de éxito son escasas —el ambiente tropical dificulta la conservación del ADN—, no se pierde nada en intentarlo.

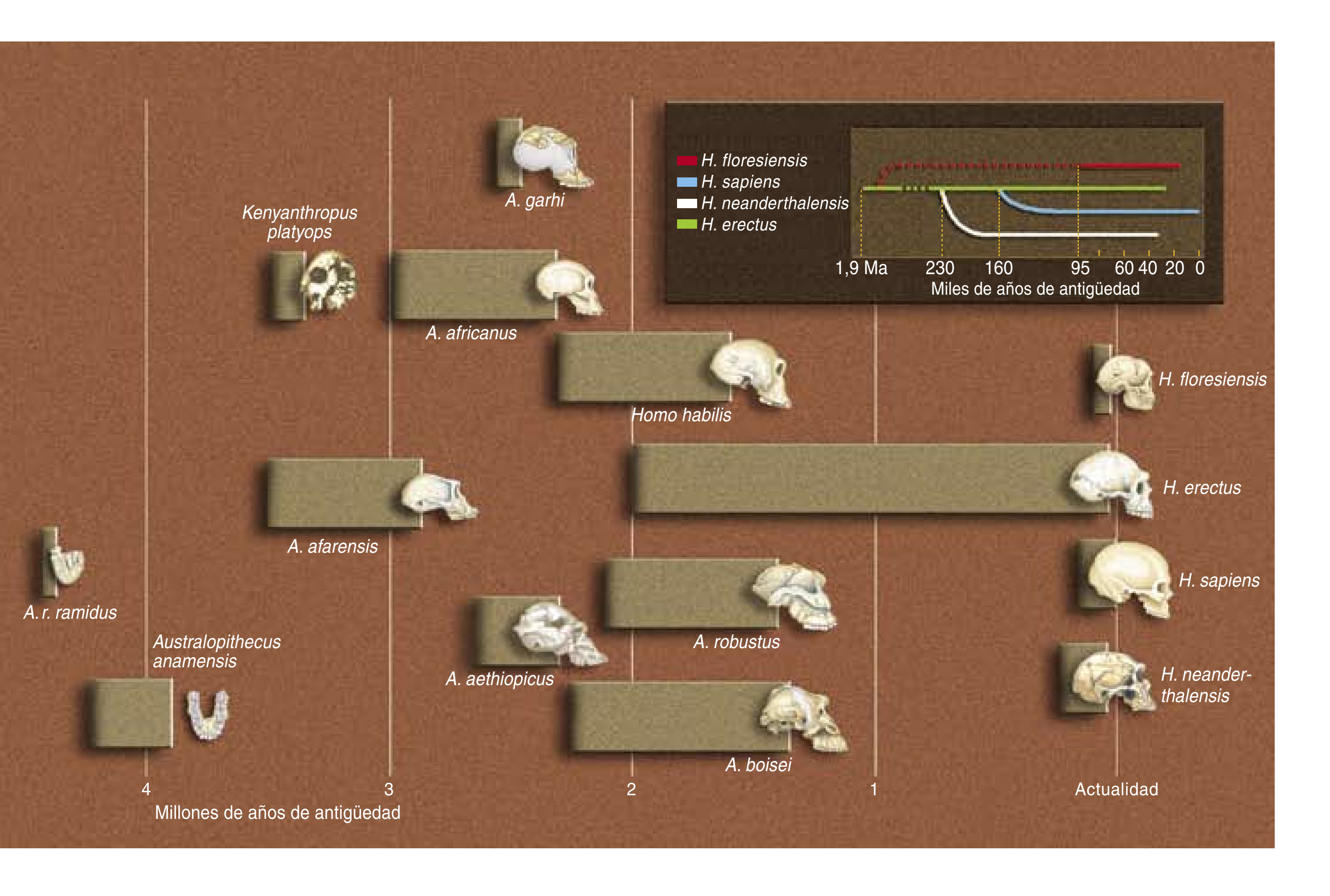
En su empeño por resolver este rompecabezas evolutivo, Brown propone tres posibles explicaciones: *H. floresiensis* desciende quizá de los antiguos pobladores de Flores, que, tras su llegada a la isla, habrían empequeñecido (éstos serían los posibles autores de la industria lítica, de 840.000 años de antigüedad, hallada en la depresión de Soa); también podría ser que los antepasados de *H. floresiensis* menguaran en otra isla, antes de llegar a Flores; por último, puede incluso que el antepasado del homínido de Flores ya mostrara un tamaño reducido antes de poblar el sudeste asiático.

De hecho, en numerosos aspectos, LB1 guarda mayor semejanza con los *H. erectus* africanos y los homínidos hallados en la República de Georgia que con los

ARBOL GENEALOGICO

A partir de los fósiles de Flores, Peter Brown, de la Universidad de Nueva Inglaterra en Armidale, y su equipo han identificado una nueva especie del género *Homo*: *H. floresiensis*. Añaden así una nueva rama al árbol evolutivo de la familia de los homínidos. El número de especies homínidas contemporáneas a *H. sapiens* asciende así a cuatro, considerando a los neandertales una especie distinta de la nuestra. Algunos opinan que *H. floresiensis* desciende de *H. erectus* (*recuadro*); otros, en cambio, sostienen que podría tratarse de un *H. sapiens* u *H. erectus* afectado por una patología, o quizás un descendiente de los anteriores y más primitivos *H. habilis* o australopitecinos.





H. erectus hallados en Java, aunque estos últimos se encuentren más próximos geográficamente. Pero todavía queda por aclarar si esta semejanza indica que *H. floresiensis* proviene de una incursión de *H. erectus* en el sudeste asiático anterior a la que dio lugar a los *H. erectus* en Java, o bien corresponde a un resultado fortuito del proceso de empequeñecimiento. Nuevas excavaciones quizá resuelvan estas dudas. El equipo planea retomar las excavaciones en Flores y Java, para extender su radio de investigación a otras islas indonesias.

Los fósiles humanos de Liang Bua abarcan un período de entre hace 95.000 y 13.000 años. Ello sugiere que los pequeños pobladores de Flores se extinguieron junto al *Stegodon* enano, debido a una gran erupción volcánica que tuvo lugar en esa zona hace 12.000 años. Sin embargo, quizá sobrevivieron en otras regiones más orientales. Si, tal y como revelan algunos indicios, *H. erectus* sobrevivió en Java hasta hace 25.000 años y *H. sapiens* llegó a esta región hace unos 40.000 años, tres especies diferentes de homínido habrían medrado codo con codo en el sudeste asiático durante al menos 15.000 años. Es probable que se encuentren más fósiles en otros yacimientos. Las islas de Lombok y Sumbawa pudieron constituir lugares de paso obligado para los homínidos que se desplazaron desde Java o desde el continente hacia la isla de Flores. Quizás aquellos que se establecieron en esas islas tomaran también su propia dirección evolutiva.

Otra hipótesis apunta que alguna de estas ramas evolutivas de *Homo* podría haber sobrevivido hasta tiempos históricos. Tal vez incluso pudieran pervivir en alguna región remota en la densa selva tropical del sudeste asiático, esperando (o evitando) ser descubiertos. En Flores, algunas leyendas cuentan que cuando se produjo la colonización holandesa, en el siglo XIX, los *ebu gogo* todavía existían. El folclore malayo describe una pequeña especie de humano, el *orang pendek*, que, supuestamente, vive en Sumatra.

En todas las culturas aparecen mitos o leyendas similares. Es posible que nunca descubramos si las leyendas acerca de los *ebu gogo* y los *orang pendek* reflejan la existencia de otras especies de homínido, pero la posibilidad de encontrarlos, que ha cobrado fuerza tras el hallazgo de LB1, sin duda impulsará su búsqueda durante las generaciones futuras.

PATRICIA J. WYNNE, CORNELIA BLIK Y EDWARD BELL

Bibliografía complementaria

ARCHAEOLOGY AND AGE OF A NEW HOMININ FROM FLORES IN EASTERN INDONESIA. M. J. Morwood y otros en *Nature*, vol. 431, págs. 1087-1091; 28 de octubre, 2004.

A NEW SMALL-BODIED HOMININ FROM THE LATE PLEISTOCENE OF FLORES, INDONESIA. P. Brown y otros en *Nature*, vol. 431, págs. 1055-1061; 28 de octubre, 2004.

Transferencia de nutrientes

Hongos ectomicorrízicos

La micorriza constituye una de las asociaciones biológicas de mayor importancia. El vocablo, que significa "hongo-raíz" (del griego *mikes* y *rhiza*), fue acuñado por el fisiólogo vegetal Anton B. Frank en 1885. Designa la simbiosis que se establece entre 6000 especies de hongos y el 95 por ciento de las plantas vasculares.

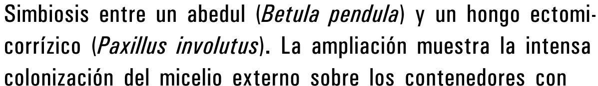
El descubrimiento de fósiles de hongos micorrízicos asociados con plantas del Devónico superior, hace 400 millones de años, ha apoyado la teoría de que la micorriza desarrolló una función crucial en la invasión y colonización de las primeras plantas de la superficie terrestre. En la actualidad, las simbiosis micorrízicas se encuentran distribuidas en todos los ecosistemas terrestres; resultan imprescindibles para su funcionamiento y mantenimiento.

Se conocen siete tipos de micorrizas: arbuscular, ectomicorriza, ectendomicorriza, arbutoide, monotropoide, ericoide y de orquídeas. Desde el punto de vista ecológico y biogeográfico, la ectomicorriza reviste particular interés. Los árboles que establecen ectomicorriza forman una franja que se extiende desde Japón, a través de Eurasia, hasta Norteamérica; incluye los biomas boreal y templado. Domina también en diversos ecosistemas tropicales de Sudamérica, Africa, Asia y Australia.

La ectomicorriza asocia unas 5000 especies de hongos con alrededor de 3000 especies de plantas, algunas con enorme interés forestal: pinos, robles, abedules, hayas, abetos y eucaliptos. Entre los hongos, sobre todo basidiomicetos, se cuentan numerosas especies comestibles para los humanos (trufas, níscalos, oronjas, rebozuelos...). El hongo simbionte cubre las raíces, a modo de manto. Las hifas crecen de este manto hacia afuera en el substrato y hacia dentro entre los espacios intersticiales de las células corticales de la raíz, formando un complejo sistema intercelular denominado "red






Simbiosis entre un abedul (*Betula pendula*) y un hongo ectomicorrízico (*Paxillus involutus*). La ampliación muestra la intensa colonización del micelio externo sobre los contenedores con necromasa de nemátodos. Se transfiere así a las plantas una proporción importante de los nutrientes contenidos en dichos nemátodos, cerrando un circuito corto de reciclaje nutrimental.

de Hartig". En general, no existe penetración intracelular en las plantas asociadas.

Entre los elementos principales de la simbiosis destaca el micelio externo. Estructural y funcionalmente constituye una interfase entre el componente edáfico y vegetal de los ecosistemas terrestres. Se estima que un metro de raíz colonizada puede estar asociada con hasta ocho kilómetros de micelio externo ectomicorrízico; en tres metros cuadrados de suelo forestal puede existir suficiente micelio como para rodear el planeta a lo largo del ecuador.

La función principal del micelio externo consiste en reciclar nutrientes. Hasta el 30 por ciento de los fotosintatos fijados por árboles que establecen ectomicorriza se utiliza para el mantenimiento del micelio simbionte. A primera vista, podría parecer un alto costo; sin embargo, desde el punto de vista ecofisiológico, se trata de una inversión: las plantas simbiontes reciben a cambio cantidades considerables de nitrógeno y fósforo entre otros nutrientes.

Tras un siglo de investigación conocemos mejor el reciclaje de los nutrientes, en particular de los compuestos minerales. Estudios recientes han mostrado que las plantas acceden también, mediante su simbiosis con el micelio de los hongos ectomicorrízicos, a nutrientes de procedencia orgánica, a los que las raíces no podrían acceder de ninguna otra forma. El micelio de algunos hongos ectomicorrízicos coloniza a gran velocidad la necromasa vegetal, microbiana o animal. Absorbe los nutrientes de estos substratos y los transfiere a los árboles asociados.

En el caso del polen, por ejemplo, la colonización por micelio de hongos ectomicorrízicos moviliza el 75 y el 97 por ciento del contenido de nitrógeno y fósforo del substrato, respectivamente, para transferir luego a las plantas asociadas el 29 por ciento de dicho nitrógeno y el 25 por ciento del fósforo. Entre las enzimas que los hongos ectomicorrízicos producen para acceder a los nutrientes contenidos en los substratos orgánicos se incluyen quitinasas, proteinasas, peptidasas, fosfatasas ácidas y alcalinas, fitasas, fosfodiesterasas, ribonucleasas y ADNasas.

Los hongos ectomicorrízicos protegen de patógenos a las plantas huésped. Asimismo, el micelio de dichos hongos establece conexión entre árboles de la misma u otra especie formando redes mediante las cuales se transfieren agua y nutrientes de suma importancia fisiológica. Se han hallado abetos, alisos, abedules, pinos y robles interconectados con hongos ectomicorrízicos. Por tanto, los árboles de los bosques no son individuos independientes; antes bien, constituyen redes vivas interconectadas por hongos simbiontes que los nutren.

JESÚS PÉREZ MORENO
Microbiología, Edafología-IRENAT,
Colegio de Postgraduados
Texcoco, México

Aerinita

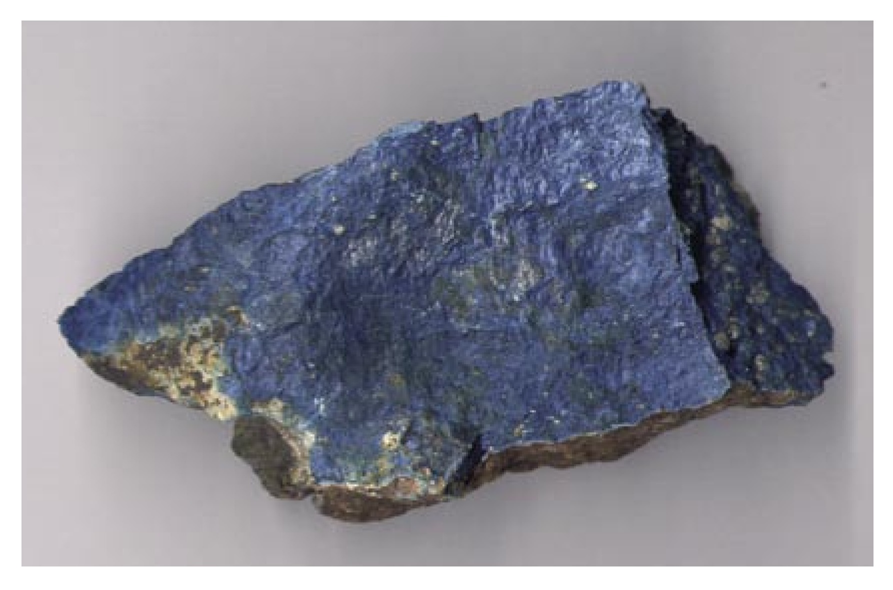
Resolución de su estructura cristalina

Los interiores de numerosas capillas románicas del Pirineo catalán estaban bellamente decorados con pinturas. La mayoría de los pigmentos que utilizaban los artistas y artesanos provenían del entorno. Para el rojo utilizaban hematites; para el ocre amarillo, goethita; para el negro, carbón; y, para el azul, aerinita. Estos pigmentos se reforzaban en caso necesario con otros de importación, más caros, como el lapislázuli, la azurita, el cinabrio, el oropimente y algunos más.

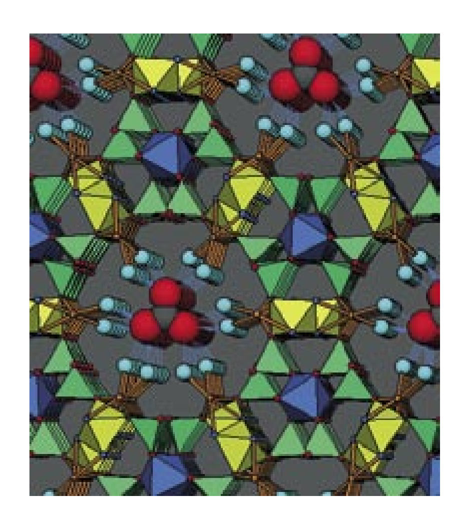
Los pigmentos se aplicaban directamente a la pared con la técnica del fresco, es decir, se pintaba sobre el mortero húmedo con una suspensión de los pigmentos finamente divididos en agua. El mortero, que cristaliza más tarde, retenía las partículas de pigmento en su interior. De todos los pigmentos, el más característico del románico pirenaico es la aerinita (*véase la figura 1*).

Desde el punto de vista mineralógico, la aerinita es un silicato hidratado de hierro, aluminio y calcio en el que el silicio forma cadenas de piroxeno. Rellena fisuras en la parte más externa de batolitos de dolerita, una roca intrusiva básica bastante frecuente en la zona pirenaica limítrofe de Lérida y Huesca. (Las rocas intrusivas son rocas ígneas, es decir, magma solidificado, que, cuando aún estaban líquidas, se introdujeron entre los estratos de otras rocas. Llámase batolito a la masa de roca intrusiva de desarrollo profundo.)

Descrita por Von Lasaulx en 1876, la aerinita se ha venido incluyendo en diferentes grupos de minerales. Se la consideró incluso una mezcla de minerales. En 1988 Azambre y



1. Aspecto de un ejemplar de aerinita con calidad de pigmento.



2. Visión a lo largo del eje de fibra de la estructura cristalina de la aerinita donde se ven claramente sus principales elementos estructurales.

Monchoux establecieron sin ambages que se trataba de una nueva especie mineral. Desde entonces, numerosos laboratorios habían intentado, infructuosamente, desentrañar su estructura cristalina. La dificultad obedecía a múltiples causas, que van desde la extrema finura de sus fibras, con diámetros inferiores a 0,1 micras, hasta la presencia de impurezas de minerales que cristalizaron junto con ella (escolecita o prehnita) o de roca encajante, pasando por su variabilidad química y la presencia de grupos carbonato integrados en la estructura. Añádase a ello que la aerinita cede y absorbe agua en función de la temperatura, una propiedad típica de los silicatos de estructura abierta del grupo de las zeolitas.

Su estructura cristalina se resolvió, por fin, mediante la técnica de difracción de rayos X en polvo del mineral. Un primer estudio, efectuado en 1998 con datos medidos en un difractómetro de laboratorio, permitió determinar su celda cristalina y su grupo espacial. En contra de lo que se había supuesto hasta entonces, la aerinita desarrollaba una red trigonal.

En un segundo estudio, que combinaba una novedosa metodología de resolución de estructuras cristalinas desarrollada en el Instituto de Ciencias de Materiales de Barcelona con los datos de difracción de alta resolución del sincrotrón del LURE en Orsay, se elucidó su estructura, que se dio a conocer en 2004.

La figura 2 muestra una perspectiva de la estructura donde se distinguen los principales detalles de su topología. En verde se representan las cadenas de tipo piroxeno, formadas por tetraedros de silicato. Los oxígenos apicales de tres de estas cadenas dan lugar a octaedros (*en azul*) apilados compartiendo caras. En los centros de dichos octaedros y distantes sólo por 2,61 Å se encuentran los cationes Fe^{2+} y Fe^{3+}, responsables de la coloración azul del pigmento. Cada una de estas unidades está conectada a tres vecinas mediante cadenas de octaedros de aluminio (*en amarillo*) y calcio (*marrón*). Por otro lado, los grupos carbonato se encuentran en el centro del canal de sección circular, al que estabilizan mediante la formación de enlaces con las moléculas de agua vecinas (*en azul claro*).

La existencia del canal explica su comportamiento zeolítico: al enfriarse después de ser calentada a 250 ºC, recupera el CO_2 y el agua expulsados. Actualmente se está estudiando la dependencia de su coloración con la relación Fe^{2+}/Fe^{3+}, así como las causas de su hábito fibroso variable.

JORDI RIUS PALLEIRO
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC)

Origen de la célula eucariota

Metabolismo protomitocondrial

Las mitocondrias son orgánulos que se encuentran en numero variable en el interior de las células. Aunque su función principal consiste en la producción de energía, en su seno se desarrollan también otras rutas metabólicas. La mayor parte de las proteínas que desempeñan estas funciones se codifican en los cromosomas del núcleo, se sintetizan en el citoplasma y se transportan luego, mediante un sistema complejo, hasta el interior de la mitocondria.

Pero hay proteínas, no muchas, que se sintetizan dentro de la mitocondria, codificadas en un diminuto cromosoma mitocondrial. Este genoma mínimo constituye la prueba más sólida de que tales orgánulos fueron, en un principio, organismos independientes.

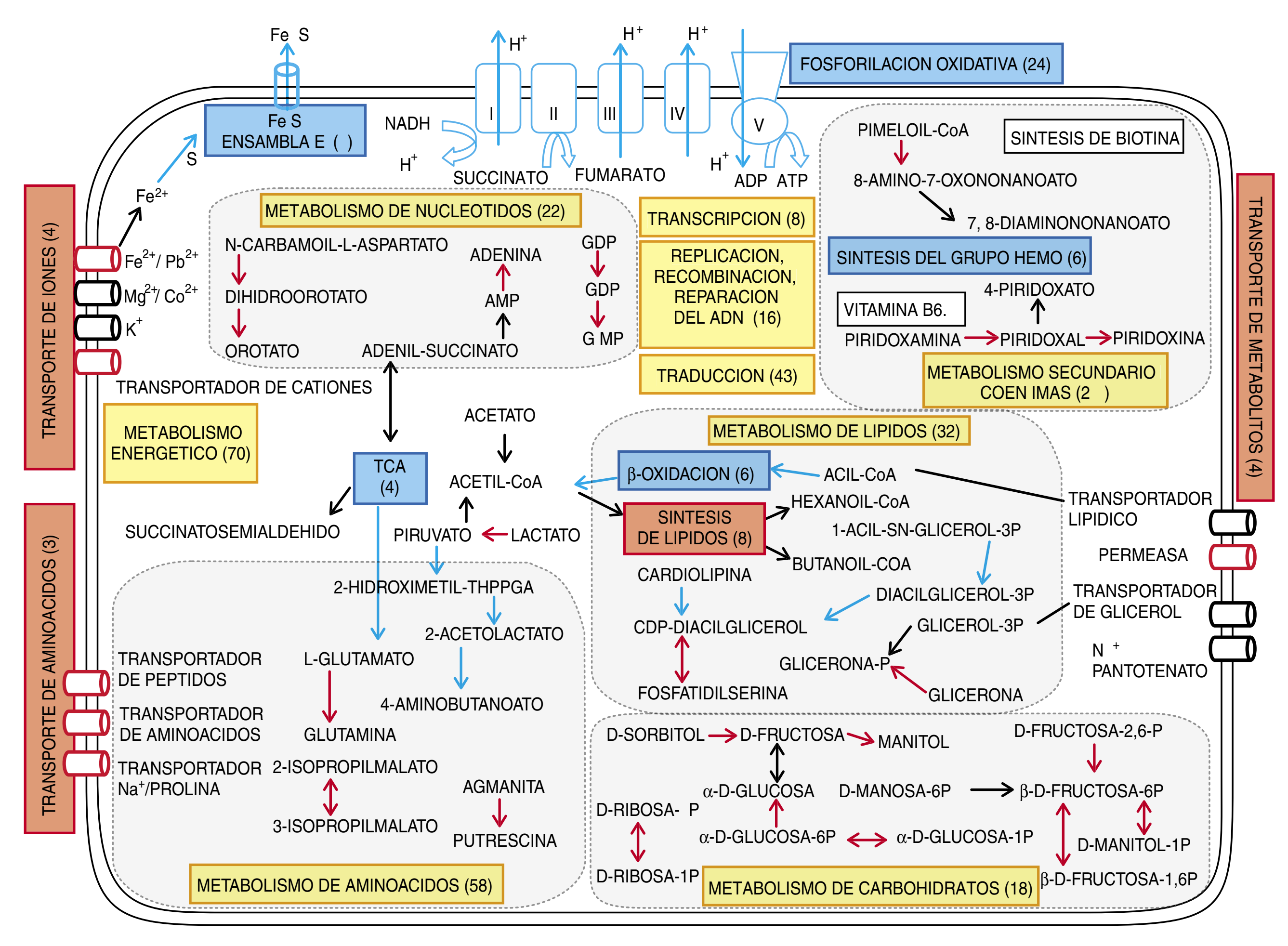
La idea de que las mitocondrias derivan de una bacteria ancestral fue sugerida por Lynn Margulis. De acuerdo con su teoría endosimbiótica, las mitocondrias y otros orgánulos se originaron a partir de bacterias que establecieron una simbiosis en el interior de una célula eucariota primitiva. A lo largo de millones de años de evolución, la primitiva protomitocondria fue transformándose en el orgánulo que hoy conocemos. En este proceso se perdieron los genes protomitocondriales que resultaban superfluos en el nuevo entorno y se transfirieron la mayoría de los restantes al núcleo de la célula eucariota.

El estudio de las secuencias de los pocos genes que aún quedan en el genoma mitocondrial ha permitido identificar con bastante detalle el grupo de bacterias al que debió pertenecer su ancestro: el de las alfaproteobacterias. Este grupo tiende a vivir dentro de otras células, a juzgar por el patrón de parasitismo intracelular que siguen algunos de sus actuales representantes.

Toda la información sobre la naturaleza de la protomitocondria y la razón de su endosimbiosis se había venido buscando en los pocos genes que, todavía hoy, se conservan en el genoma mitocondrial. Pero, ¿por qué no rastrear en los genes transferidos al núcleo?

Para hacerlo hubo que recurrir a las secuencias de genomas completos pertenecientes a más de 70 especies distintas, aplicar refinados algoritmos y técnicas de comparación de secuencias y apoyarse en computadoras lo suficiente potentes para llevar a cabo este trabajo en un tiempo razonable.

El método seguido se basó en la detección, en genomas eucariotas, de genes que descienden del genoma protomitocondrial. Esta relación evolutiva ha de verse reflejada en la secuencia del gen eucariota; es decir, ha de presentar un parecido significativo con las secuencias de alfa-



Representación esquemática del metabolismo protomitocondrial: los cuadros amarillos indican procesos metabólicos con el número de genes indicados entre paréntesis. Cuadros y flechas azules indican rutas o pasos que son mitocondriales en la actualidad, los rojos tienen una ubicación distinta; en el caso de negros o blancos se carece de información sobre su localización subcelular. (Adaptado de *Science*, vol. 301, pág. 609; 2003.)

proteobacterias. En el mejor de los casos, la reconstrucción filogenética de la evolución de estas familias de genes evidenciaría un origen común de las secuencias de eucariotas y alfaproteobacterias, lo que nos permitiría reconocerlas como los parientes más próximos dentro del conjunto de secuencias estudiadas.

Merced a la reconstrucción de más de 25.000 filogenias, identificamos 630 familias de genes que debieron de llegar a la célula a bordo del genoma protomitocondrial. Un análisis exhaustivo de las funciones codificadas por estos genes permite recrear el metabolismo protomitocondrial, una suerte de retrato robot de un organismo que vivió hace más de 1500 millones de años.

¿Qué obtuvimos? Un metabolismo bastante más diversificado que el de las mitocondrias actuales, según cabía esperar de un organismo que acababa de abandonar su estilo de vida libre. La protomitocondria tuvo, al parecer, un metabolismo aerobio y oxidativo, dependiente de la célula hospedadora a juzgar por la gran cantidad de metabolitos que podía transportar a través de su membrana.

En el metabolismo protomitocondrial no faltan las principales vías metabólicas relacionadas con la obtención de energía, tan características de las mitocondrias. En especial, la cadena de transporte de electrones, que acopla la oxidación de diversos sustratos al bombeo de protones a través de la membrana, creando un gradiente que, al deshacerse, se acopla, a su vez, a la síntesis de ATP. El sistema que exporta este ATP al citoplasma, así como el complicado mecanismo de transporte de proteínas mencionado, brillan por su ausencia.

La adquisición de estos nuevos sistemas, que desempeñaron una función esencial en la transición de simbionte a orgánulo, junto con la incorporación de nuevas proteínas a complejos moleculares y rutas ya existentes, dan idea del alto grado de complejidad alcanzado por la mitocondria. De hecho sólo un 15 % de las proteínas que se alojan en la mitocondria tienen un origen protomitocondrial; el resto son nuevas incorporaciones.

Pero lo más sorprendente ha sido el hallazgo del probable origen protomitocondrial de rutas metabólicas que no son mitocondriales en la actualidad. Tal es el caso de partes de la síntesis de ácidos grasos, del metabolismo de aminoácidos o del de ácidos nucleicos. Este hecho podría afectar a las dos terceras partes de

las proteínas de origen protomitocondrial, rutas metabólicas enteras o enzimas que la evolución ha resituado en distintos lugares, como el citoplasma, los peroxisomas o la membrana celular.

Llegamos así a una conclusión inesperada: el legado evolutivo de la simbiosis protomitocondrial hay que buscarlo no sólo en las mitocondrias y en el importantísimo papel que desempeñan en el metabolismo energético, sino también en numerosos procesos que ocurren en casi cualquier parte de la célula. Especial interés reviste la participación de la simbiosis mitocondrial en la aparición de la apoptosis, la pluricelularidad y el origen mismo de la célula eucariota.

TONI GABALDÓN ESTEVAN
Computational Genomics
Universidad de Nimega

Cuando se rompe la simetría

Higgs, supersimetría, dimensiones extra

Nuestros antepasados prehistóricos no necesitaron aparatos para detectar los efectos de las interacciones electromagnéticas, como las llamamos hoy. La luz es lo visible por antonomasia, y los demás fenómenos electromagnéticos —la electricidad estática, los relámpagos, las propiedades magnéticas de algunas rocas, como la magnetita— eran bien conocidos en la antigüedad.

Pero se necesita un poco de técnica moderna para descubrir siquiera sea la existencia de las interacciones débiles, no digamos ya para entenderlas. Supimos por primera vez de las interacciones débiles con el descubrimiento de la radiactividad en 1896. Algunos núcleos radiactivos se desintegran emitiendo "partículas β", que ahora sabemos son electrones de energía elevada. Esta desintegración nuclear β es la ventana más accesible a las interacciones débiles; hasta mediados del siglo pasado, hasta que no aparecieron los detectores de rayos cósmicos, los reactores nucleares y los aceleradores de partículas, no hubo otra.

Antiguamente, la electricidad, el magnetismo y la luz parecían ir cada uno por su parte. El conocimiento unificado que de ellos se forjó en el siglo XIX llevó a describirlos en conjunto como fenómenos "electromagnéticos".

El electromagnetismo se nos muestra mucho más abiertamente que las interacciones débiles. Pero éstas y aquél mantienen un perfecto paralelismo, según nuestros conocimientos actuales, sistematizados en el "modelo estándar" de la física de partículas. Así, el electromagnetismo obedece a las ecuaciones de Maxwell y las interacciones débiles, a un grupo de ecuaciones bastante semejante, aunque no lineal (las ecuaciones de Yang-Mills). Y si una partícula elemental, el fotón, es la unidad cuántica básica del electromagnetismo, otras similares, los bosones W y Z, lo son de las interacciones débiles. A causa de esta estrecha relación entre el electromagnetismo y las interacciones débiles, los físicos de partículas se refieren hoy a ambos grupos de fenómenos con la denominación de "interacciones electrodébiles".

Si las interacciones débiles se parecen al electromagnetismo, ¿por qué resultan tan distintas en la vida diaria? Según el modelo estándar, la clave es la "rotura de la simetría". Incluso si las leyes de la naturaleza tienen una simetría —en este caso la simetría entre el electromagnetismo y las interacciones débiles, o entre el fotón y los bosones W y Z—, las soluciones de las ecuaciones pueden carecer de ella.

Por ejemplo, es igual de probable que en un líquido un átomo se mueva por una dirección del espacio u otra; no hay unos ejes coordenados preferidos. Pero si enfriamos el líquido hasta que se congele, se formará un cristal, que tiene ejes característicos. Todos las direcciones del espacio son igualmente posibles como ejes del cristal, pero cuando el líquido se hiela, siempre emergen ciertos ejes preferentes. La simetría entre las distintas direcciones del espacio se ha perdido, o se ha "roto espontáneamente".

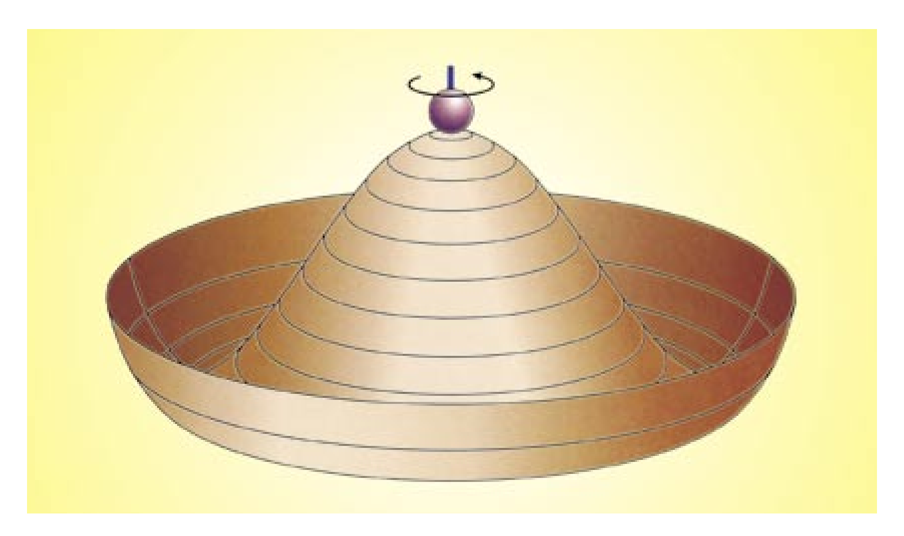
Según el modelo estándar, justo después de la "gran explosión" ocurrió algo semejante. A las altas temperaturas que existían entonces, había perfecta simetría entre el fotón y los bosones W y Z; el electromagnetismo y las interacciones débiles nos habrían parecido igual de manifiestos. Pero a medida que el universo se enfrió, sufrió una transición de fase, análoga a la congelación de un líquido, en la que la simetría se "rompió espontáneamente". Como los bosones W y Z adquirieron entonces masa, las interacciones débiles se restringieron a las distancias nucleares: sus efectos no podrían ya percibirse a simple vista. El fotón permaneció sin masa, de ahí que los efectos del electromagnetismo se propaguen a distancias características de la escala humana (y mucho mayores) y se manifiesten de inmediato en la vida diaria.

La experiencia ha ratificado la mayoría de los aspectos del modelo estándar. El momento magnético del electrón se mide hasta la decimosegunda cifra significativa, con resultados que concuerdan muy bien con la teoría. Muchas de las propiedades de los bosones W y Z que predice se han comprobado hasta el tercer o cuarto dígito. Muy recientemente, se ha verificado en laboratorios de California y Japón el mecanismo por el cual el modelo estándar viola la simetría entre materia y antimateria.

La faceta del modelo estándar que aún no hemos sido capaces de contrastar experimentalmente es quizá la más fundamental: ¿cómo se rompe la simetría? Sin embargo, tenemos una idea bastante clara acerca de dónde se puede encontrar tal información. De la misma manera que con las masas y las energías de enlace de los átomos se puede estimar el punto de fusión de los cristales, cabe valerse de las masas de W y Z y de otras propiedades observadas de las partículas elementales para evaluar la temperatura, o energía, muy alta que han de alcanzar los aceleradores de partículas para explorar la rotura de la simetría electrodébil. Quizá se halle al alcance del acelerador más potente del mundo, el Tevatrón del Fermilab, en Chicago, y ciertamente no se le escapará al Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el nuevo acelerador que deberá entrar en funcionamiento en el año 2007 en el CERN, cerca de Ginebra.

¿Qué esperamos encontrar? En la versión original del modelo están-

dar (la que se lee en los libros de texto), la clave de la rotura de la simetría electrodébil es la "partícula de Higgs". A altas temperaturas, las partículas de Higgs, como las demás, se movían al azar. Pero a medida que el universo se enfrió, se combinaron en un "condensado de Bose", un estado ordenado donde muchas partículas comparten la misma función de ondas cuántica; en el caso del helio, esta propiedad conduce a la superfluidez. La "dirección" (en un espacio abstracto que describe las diferentes fuerzas de las partículas) del condensado de Bose rompe la simetría electrodébil más o menos de la misma manera que, en un cristal, la simetría rotacional se rompe en las direcciones de sus ejes. Aunque esta propuesta es sencilla y se ajusta a los hechos conocidos, no es probable que ofrezca una explicación completa. Sin un artificioso ajuste de los parámetros, la masa de la partícula de Higgs no es lo suficientemente pequeña como para que el modelo funcione.



Cuando la bola caiga por la pendiente, romperá la simetría del sombrero.

Numerosas propuestas alternativas resuelven este problema específico, pero introducen nuevas dificultades. Según una de estas hipótesis, motivada por un fenómeno característico de los superconductores, la partícula de Higgs aparecería como un estado ligado. Aunque se solucionaría así el problema de obtener la masa correcta, se requeriría un conjunto de nuevas partículas y fuerzas que aún no se han observado. Deberían ser detectables en el LHC. Hasta ahora, los modelos de este tipo han tropezado con muchas dificultades, pero quizá la naturaleza conoce ardides que los formuladores de modelos desconocen.

Una idea más radical es la "supersimetría", nueva clase de simetría de las partículas elementales en la que se incorporan variables cuánticas a la estructura del espaciotiempo. Evita que las interacciones de partículas hagan demasiado grande la masa de la partícula de Higgs, pero, de nuevo, predice un conjunto de nuevas partículas adicionales que podrían descubrirse en el LHC y, quizás, en el Tevatrón.

La supersimetría es la única idea acerca de la rotura de la simetría electrodébil que realmente ha ofrecido resultados tangibles hasta ahora. Se ha confirmado experimentalmente una relación, entre las distintas intensidades de las interacciones, que se desprende de la supersimetría. Además, nuestros mejores intentos de lograr una más completa unificación de las fuerzas de la naturaleza (las "teorías de gran unificación" y la "teoría de cuerdas") sólo se tienen en pie si se presupone la supersimetría. Por otro lado, los modelos supersimétricos plantean numerosas cuestiones sorprendentes para las que los constructores de modelos aún no tienen respuestas convincentes. Si se confirmase la existencia de la supersimetría, saber cómo la naturaleza aborda esas cuestiones seguramente nos proporcionaría elementos necesarios para que la entendamos cabalmente.

Otras reflexiones acerca de la rotura de la simetría electrodébil ahondan aún más. Una línea de pensamiento relaciona este problema con dimensiones extra del espaciotiempo, de tamaño subnuclear pero observables en los aceleradores. Es ir muy lejos, pero la recompensa sería enorme: descubrir dimensiones extra nos daría la posibilidad de efectuar comprobaciones experimentales directas de la naturaleza cuántica de la gravedad y de los agujeros negros.

Finalmente, otra línea de pensamiento relaciona la rotura de la simetría electrodébil con la energía oscura del universo, descubierta en los últimos años al observarse que la expansión del universo está acelerándose. Este punto de vista quiere ligar la relativa pequeñez de la masa de la partícula de Higgs con la pequeñez de la energía oscura. El principio antrópico es un modo de abordar la cuestión. Establece que la energía oscura y la masa de la partícula de Higgs toman distintos valores en distintas partes del universo; nosotros, por fuerza, hemos de vivir en una región donde resulten lo bastante pequeños como para que sea posible la vida. Si así fuera, muchas otras propiedades del universo, que por lo normal consideramos fundamentales —como la masa y la carga del electrón—, no serían más que accidentes del entorno. Aunque yo espero que este enfoque no sea correcto, irá arraigando, no hay vuelta de hoja, si los experimentos muestran que la rotura de la simetría electrodébil viene gobernada por el modelo estándar de los libros de texto, con una partícula de Higgs y nada más.

Por el momento, ninguna de estas propuestas teóricas acerca de la rotura de la simetría electrodébil parece del todo satisfactoria. Esperemos que a finales de este decenio los resultados experimentales del Tevatrón y del LHC nos encaminen por la vía correcta. Pero la diversidad y el alcance de las ideas acerca de la rotura de la simetría electrodébil sugieren ya que la solución de este enigma determinará la dirección futura de la física de partículas.

EDWARD WITTEN
Instituto de Estudios Avanzados,
Escuela de Ciencias Naturales,
Princeton

DE CERCA

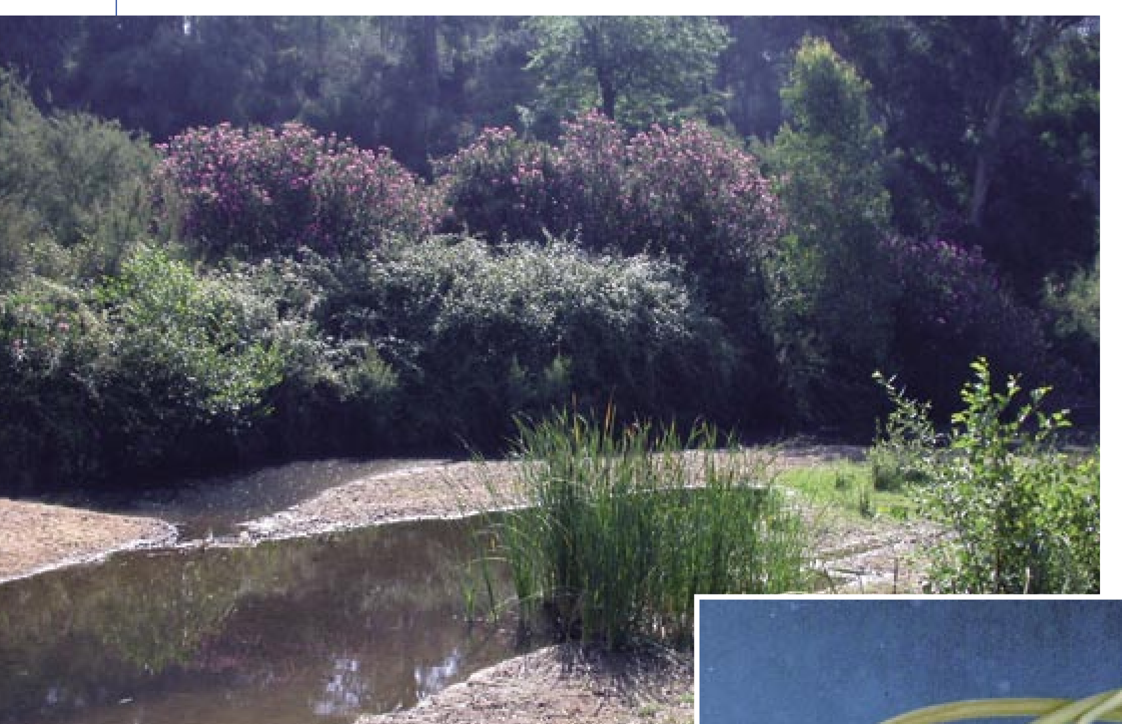
José Breciani y Pablo J. López González

Del oráculo a los nematomorfos

En la antigüedad se recurría a mitos y leyendas para explicar los procesos del mundo natural. Algunos misterios, así el origen de la vida, persistieron a lo largo de siglos. Francesco Redi, "padre de la parasitología", refutaba en 1668 la idea de la *generación espontánea*, al poner de manifiesto, a través de ingeniosos experimentos, que las orugas se desarrollaban a partir de huevos. A menudo, los naturalistas han acudido también a la mitología en busca de sucesos y asociaciones con los procesos biológicos que observaban. Una interacción que ha quedado reflejada en la propia denominación de las especies.

Sírvanos de ejemplo los nematomorfos, uno de los grupos zoológicos menos conocidos. Este filo, adscrito a la misma categoría que artrópodos, equinodermos y moluscos, comprende un pequeño grupo de animales filiformes que pueden alcanzar hasta un metro de longitud, pero de apenas 1 a 3 milímetros de grosor. Se les conoce por *gusanos crin* o *gusanos pelo*, pues en su origen se creía que procedían de la crin de los caballos que se acercaban a abrevar y que, al caer accidentalmente en el agua, adquirían vida propia; una suerte, pues, de prototipo para los seguidores de la *generación espontánea* de la vida.

En estado adulto, los nematomorfos viven libres en ambientes acuáticos, acuidulces o marinos. La larva, de vida libre, parasita un artrópodo y se alimenta de sus fluidos internos. No saldrá hasta alcanzar la madurez. En ninguno de los estados de vida libre se alimentan por sí solos. Durante la cópula más de quinientos ejemplares (entre machos y hembras) pueden enredarse y formar unas madejas intrincadas: los *nudos gordianos*. La expresión evoca un famoso suceso mitológico en el que un oráculo anunció a los habitantes de Frigia (actual Anatolia) que debían hacer rey al primero que entrase en la ciudad con un cuervo posado sobre su carro de bueyes. La suerte le cupo a Gordias, un pastor que, en agradecimiento, ofreció su carro a Zeus. El yugo y el timón de su carro estaban unidos por un nudo tan fuerte, "el nudo gordiano", que el oráculo predijo que quien lograra desatarlo se aseguraría el dominio de Asia. Lo consiguió Alejandro Magno cuatro siglos después con ayuda de su espada. Nombres como *Gordius*, Gordiidae, Gordea y Gordioida han quedado para siempre en la literatura científica gracias a estos mitos y leyendas.



1. Los nematomorfos, en estado adulto, pueden encontrarse en ambientes acuáticos, marinos y acuidulces. De las especies conocidas, sólo dos son marinas.

ANDREAS SCHMIDT-RHAESA

2. Adulto del género *Gordius* que ha abandonado su hospedador. En adelante, habrá de encontrar con quién reproducirse y proseguir su propio ciclo biológico y la propagación de su especie.



3. Los estado juveniles son endoparásitos de artrópodos. Sólo emergen de éstos al llegar a la madurez. En la imagen vemos un ejemplar de *Nectonema agile*, en el interior de su hospedador, un crustáceo decápodo, *Palaemonetes vulgaris*.



4. En las especies de nematomorfos que parasitan artrópodos terrestres, cuando el parásito está listo para salir, induce a su hospedador a acercarse a cursos de agua próximos. Es entonces cuando emerge. En la imagen, la especie *Gordius aquaticus* abandona a un coleóptero.



5. En los adultos libres, la parte anterior del animal degenera. Los adultos no se alimentan; hasta su muerte, tras la reproducción, vivirán a expensas del alimento acumulado durante su vida endoparásita. En la imagen de microscopía electrónica de barrido, una hembra del género *Nectonema*.



ANDREAS SCHMIDT-RHAESA

6. Hasta más de quinientos ejemplares pueden reunirse en lo que se denomina los "nudos gordianos", donde machos y hembras se entremezclan para realizar la cópula y continuar así su ciclo de vida.

Vida y muerte del acu

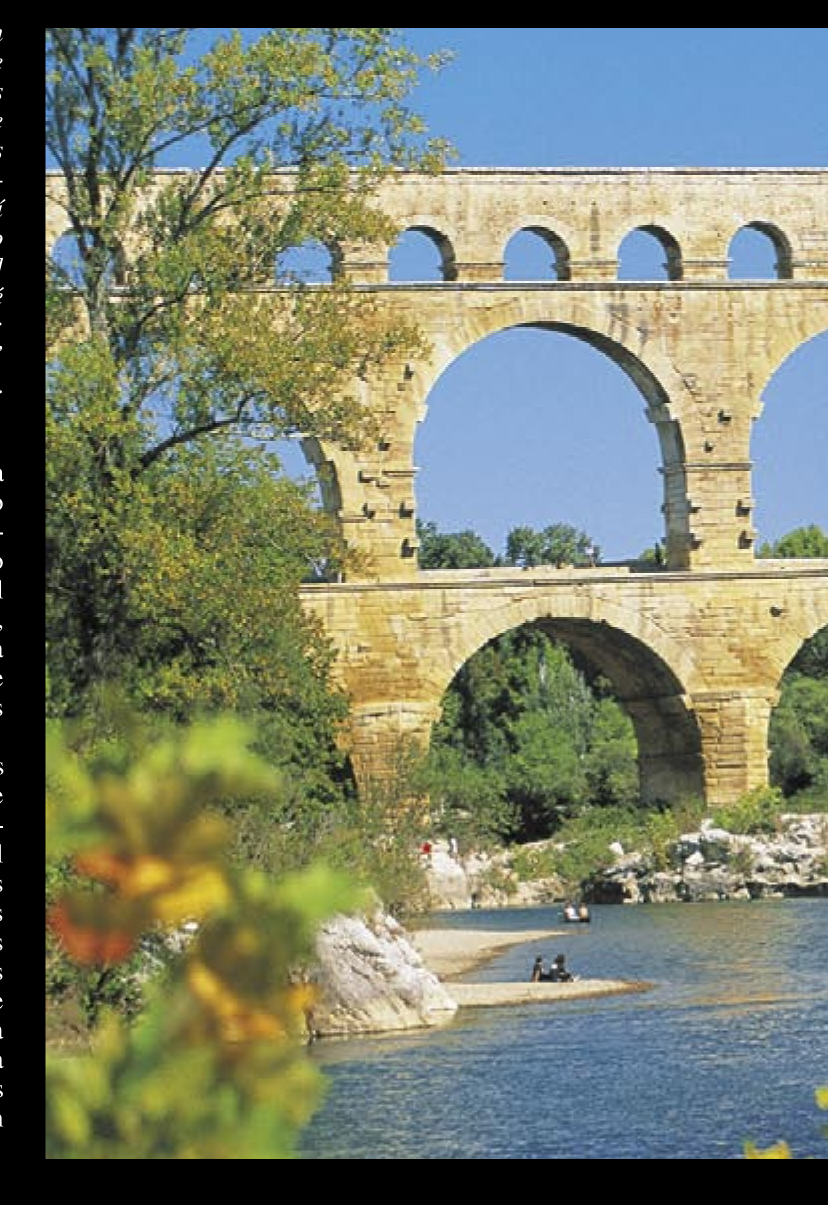
Quince años de excavaciones consagradas al acueducto de Nîmes y al puente del Gard han revelado elementos desaparecidos. La historia de este monumento y de su utilización ha sido escrita de nuevo

Guilhem Fabre, Jean-Luc Fiches y Jean-Louis Paillet

"Tras desayunar unos higos excelentes, tomé un guía y fui a ver el puente del Gard. [...] El arte de esta fábrica sencilla y noble me admiró tanto más porque se encuentra en mitad de un desierto, donde el silencio y la soledad hacen que impresione más y que la admiración sea más viva, pues este presunto puente no era sino un acueducto. [...] Recorrí los tres pisos de este edificio soberbio, el respeto impidiéndome casi osar hollarlo con mis pies. [...] Sentí, al tiempo que me empequeñecía, un no sé qué que me elevaba el alma, y yo me decía, suspirando: "¡Que no haya nacido romano!"
Jean-Jacques Rousseau, *Confesiones*, 1ª parte, libro VI.

El puente del Gard, que tanto asombro causaba al filósofo ginebrino, es el puente-acueducto más notable del mundo romano. Con un alzado de 48,77 metros, soporta el acueducto por donde, hace casi 2000 años, corría el agua de las fuentes de Eure, cerca de Uzès, hasta Nîmes, tras un viaje de 50 kilómetros. Por la altura de sus puentes, pero también por el ingenio de su construcción, el acueducto de Nîmes es una de las obras cimeras de la ingeniería hidráulica romana.

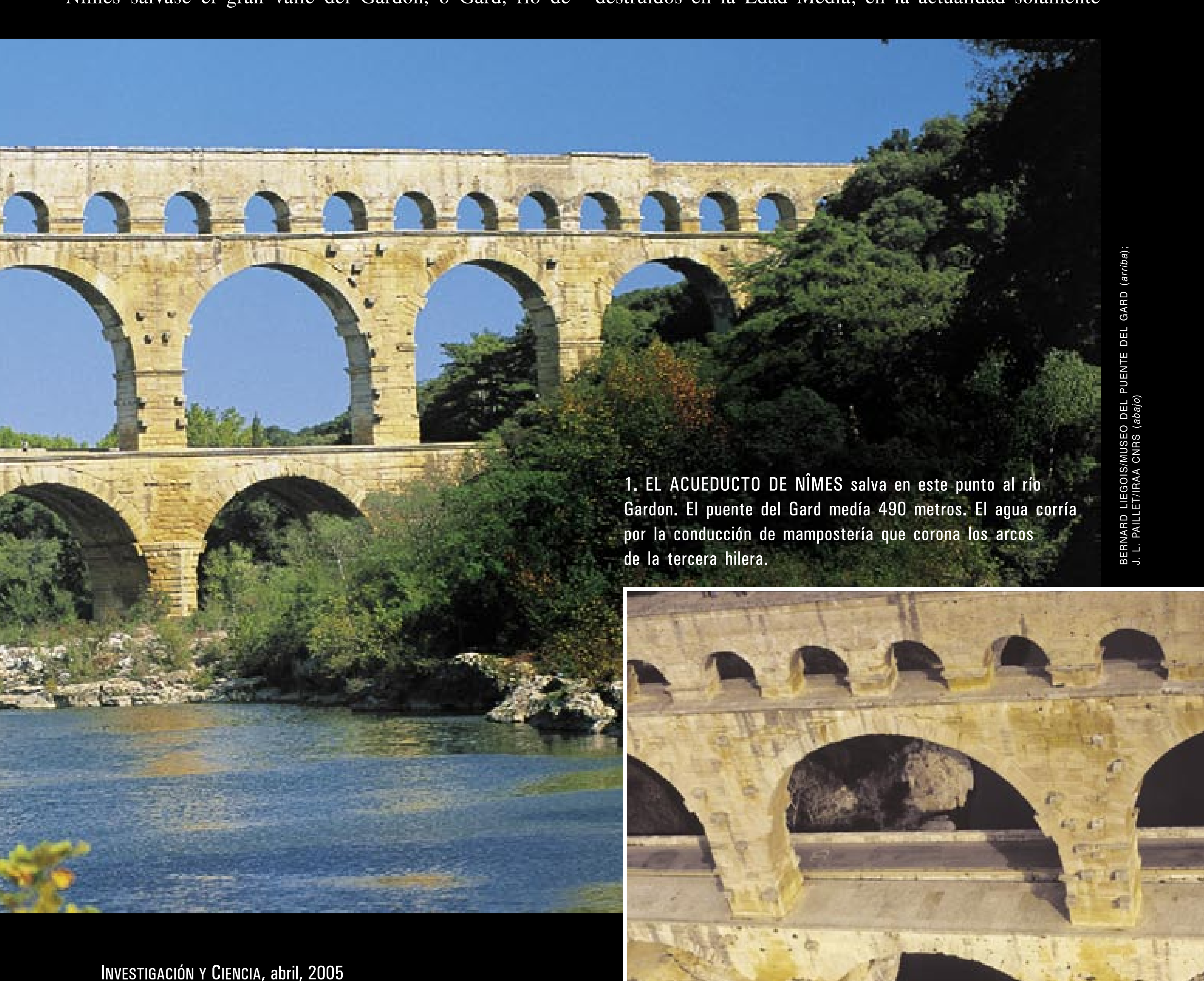
Hasta las investigaciones arqueológicas emprendidas en 1984, se tenía del monumento una visión bastante romántica, heredada del siglo XIX. El estudio topográfico riguroso del trazado y de la pendiente del acueducto, la excavación minuciosa de las sucesivas etapas de construcción y un examen de los depósitos calcáreos de su interior y exterior han ayudado a los arqueólogos a rehacer el proyecto de los constructores y a conocer los usos a que se destinó la obra durante casi cinco siglos. Tras una descripción arquitectónica del puente del Gard, evocaremos en primer lugar la concepción y el trazado del acueducto, y examinaremos qué fue de él, desde sus orígenes hasta que cayó en desuso a finales del siglo VI.



educto de Nîmes

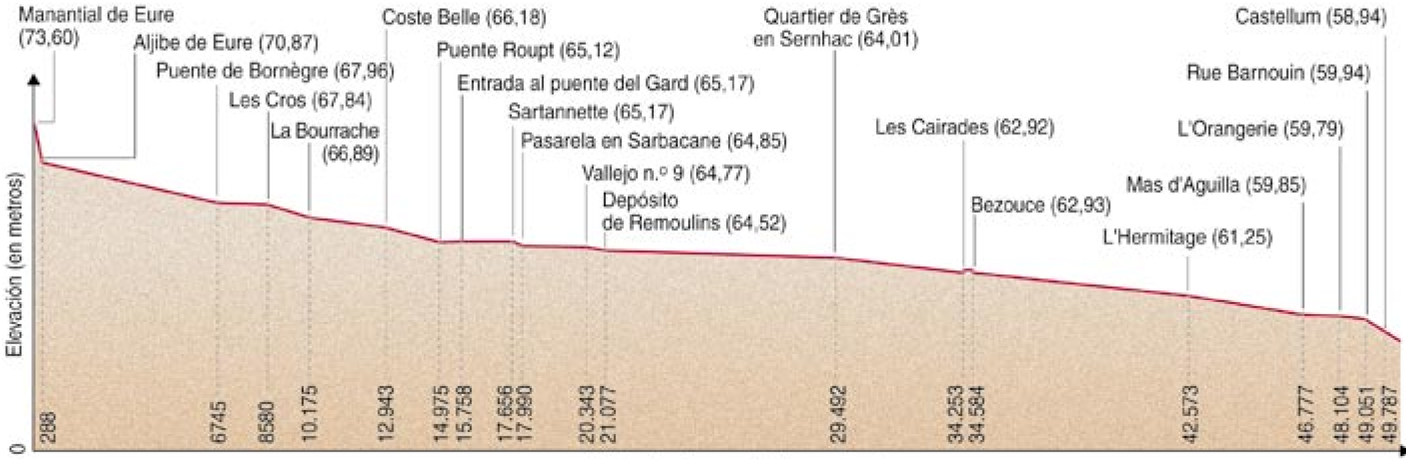
Nîmes, capital del pueblo galo de los volcos arecomicos, se convirtió en colonia latina hacia el 45 antes de nuestra era. Conoció a partir de entonces una importante expansión, y su población pasó de unos pocos millares de almas hasta unos 20.000 habitantes al principio del siglo I. Las necesidades de agua de la población estaban satisfechas por el manantial de la Fontaine y gran número de pozos. La realización de un acueducto fue, ante todo, una iniciativa de prestigio, destinada a permitir la multiplicación de las fuentes y la creación de establecimientos de baños en la ciudad. La obra contribuía a la higiene y al ornato ciudadanos, pero no constituía una necesidad económica.

El puente, cuyo propósito era que el canal que irrigaba Nîmes salvase el gran valle del Gardon, o Gard, río de crecidas a veces violentas, consta de tres niveles. Los pilares inferiores, dotados de tajamares que hienden la corriente, se asientan sobre cimientos rocosos, lo que asegura a la construcción una adecuada resistencia cuando sube el nivel del río. El arco central, con una luz de 24,52 metros, salva de un solo salto el cauce principal. Sobre la base, se alza una segunda hilera de arcos. Sus pilares, aplomados sobre los del primer nivel, aumentan la estabilidad del conjunto. Una tercera hilera de 35 arcos levanta la obra otros 7 metros y soporta el canal a una altura suficiente para asegurar el flujo natural de las aguas hacia Nîmes. Inicialmente, el último nivel, cuya longitud, incluidos los estribos, era de 490 metros, se prolongaba con 12 arcos más, que fueron destruidos en la Edad Media; en la actualidad solamente



1. EL ACUEDUCTO DE NÎMES salva en este punto al río Gardon. El puente del Gard medía 490 metros. El agua corría por la conducción de mampostería que corona los arcos de la tercera hilera.

BERNARD LIEGOIS/MUSEO DEL PUENTE DEL GARD (*arriba*); J. L. PAILLET/IRAA CNRS (*abajo*)



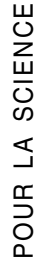
quedan 275 metros. Los tres pisos, cada vez más estrechos, se elevan como estructuras independientes.

La preocupación de los arquitectos romanos era únicamente la erección de un edificio sólido. Las aguas del Gardon han crecido no pocas veces hasta el primer nivel del puente; la tierra ha temblado, pero la obra, en veinte siglos, no ha sufrido jamás quebrantos serios. Lo esencial del puente está construido en "gran aparejo" es decir, con piedras de hasta seis toneladas. Los bloques se ensamblaron con juntas vivas (sin mortero), sin más ligadura que espigas de roble talladas en cola de milano, de las que se han hallado algunos ejemplares. Tan sólo la parte más alta, la situada sobre los arcos del tercer piso, consiste en unas hiladas de piedras pequeñas ligadas con mortero; forman las paredes del canal.

Una obra racional

La construcción de un acueducto era empresa de gran aliento. La del *Aqua Claudia* y el *Anio Novus* de Roma, cuyas longitudes respectivas son de 69 y de 87 kilómetros, exigió 14 años: se presume que los trabajos del acueducto de Nîmes hubieron de durar casi el mismo tiempo. Los movimientos de tierras, la perforación de túneles y el transporte de materiales estuvieron, sin duda, a cargo de peones, pero una obra de tanta importancia hubo indispensablemente de exigir mano de obra cualificada local. En la construcción del acueducto participaron no sólo canteros y albañiles, sino también carpinteros, herreros y especialistas en hornos de cal. La obra más importante fue la construcción del puente del Gard; movilizó,

2. PARA CONECTAR LOS MANANTIALES DE EURE con la villa de Nîmes, los ingenieros romanos construyeron un acueducto de poca pendiente, con una serie de largos rellanos muy levemente inclinados en los que se intercalan caídas más rápidas (*arriba*). Los ingenieros sacaron el máximo partido posible al terreno para evitar la construcción de puentes y la excavación de túneles, pero ello les obligó a largos desvíos que seguían las líneas de nivel. El acueducto tiene una longitud de casi 50 kilómetros (*a la izquierda, en rojo*). La dificultad principal con que tropezaron fue el cambio de vertiente en las garrigas de Uzès y de Nîmes. Vemos al lado el detalle de la parte en que el acueducto salva el río Gardon.



tal vez, un millar de hombres durante cinco años. Este tramo abarca menos del uno por ciento de la longitud total, pero fue el más difícil.

El edificio necesitó unas 50.400 toneladas. El material, una caliza blanda de grano grueso y color amarillento, proviene de la cantera de l'Estel, situada a 600 metros, aguas abajo del monumento. Excavaciones recientes han revelado las marcas dejadas por los picos de los canteros y las cuñas metálicas utilizadas. Se extrajeron alrededor de 120.000 metros cúbicos de piedra: resulta verosímil que la cantera de l'Estel suministrase la piedra de todas las estructuras del acueducto hasta las inmediaciones de Sernhac.

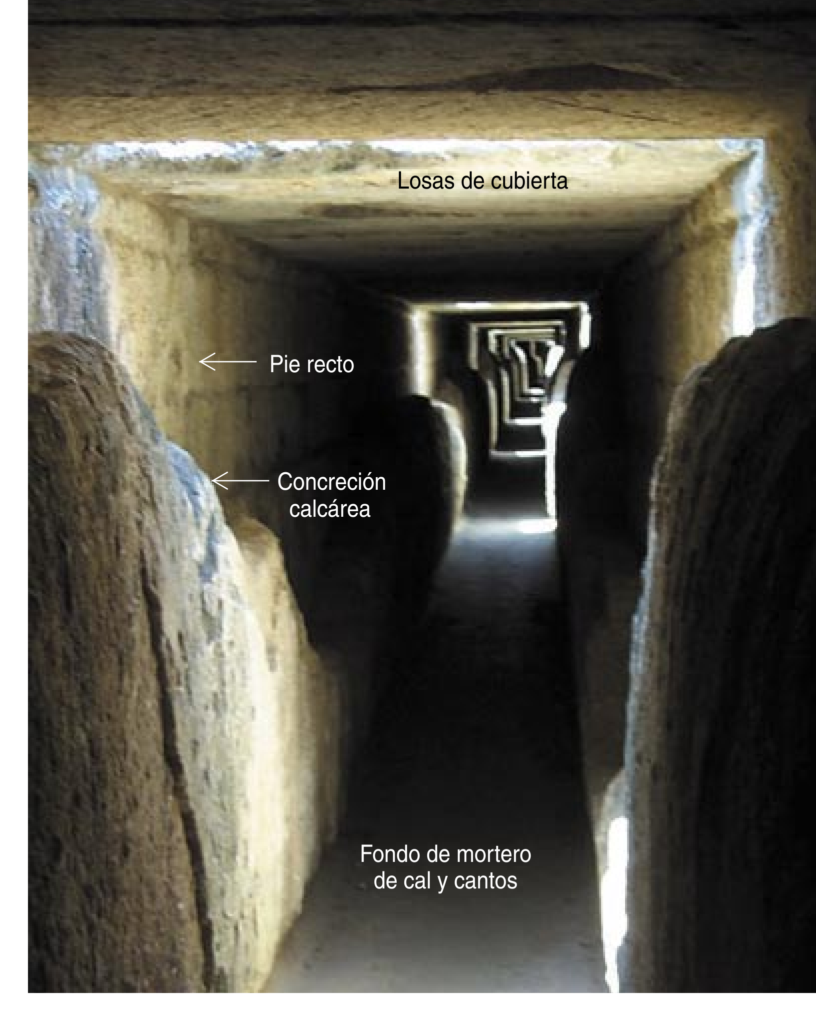
El monumento conserva el recuerdo de una organización racional del trabajo. Los bloques de piedra se tallaban y numeraban en la cantera, según las prescripciones del cuaderno de aparejos (el pliego de órdenes de la época) que indicaba la forma y emplazamiento de cada piedra. Todavía son visibles las cifras que indican la ubicación de los bloques, grabadas sobre dovelas de los arcos. Por ejemplo, la inscripción FR.S.III (*frons sinistra tertia*) designa al tercer bloque de fachada de un arco de la parte izquierda.

Los obreros, que no se tomaron la molestia de borrar estas marcas, no retiraron tampoco las dovelas en voladizo destinadas a sostener las cimbras de los arcos y los andamios. Ciertos bloques que sobresalen de los paramentos debieron servir de apoyo para los tornos elevadores. Los bloques sólo se pulieron por el interior; en sus caras externas son visibles todavía las huellas de los picos. Esta obra, carente de acabados superfluos, se convirtió en modelo. Generaciones de obreros cualificados vinieron a estudiarla y reprodujeron por doquier su técnica. El puente de Saint-Bénezet de Aviñón retoma su esquema general, mientras que las dovelas en voladizo serían motivo recurrente en la decoración de las iglesias románicas.

Se ha buscado desde hace mucho la identidad del arquitecto que concibió no sólo este puente del Gardon, sino también los 16 puentes que franqueaban los valles someros y pequeños cursos fluviales que el acueducto sobrevuela. Todas estas construcciones exhiben una notable unidad arquitectónica. Cierto es que el nombre de Veranius está grabado en un arco del segundo piso del puente del Gard, pero se trata de un patronímico romano corriente. La silueta que adorna la clave de un arco del segundo piso pudiera corresponder tanto al responsable de la construcción, con un rollo de los planos en su mano izquierda, como a un cantero en el trabajo. El arquitecto, en todo caso, ha dejado un mensaje: en uno de los pilares inferiores, la inscripción *mens totum corium* señala que se midió la altura total del monumento.

Una sencilla acequia de piedra

Por impresionante que parezca, el puente del Gard no es sino el soporte de una larga conducción que transportaba agua desde Uzès hasta Nîmes. El agua de los acueductos circulaba siempre por un canal de mampostería, el *specus*; los tubos de plomo estaban reservados para la distribución en la ciudad y para los sifones. La construcción del *specus* se adecua al esquema general de los acueductos romanos (*véase la figura 3*). El encachado



3. EL CANAL CONDUCTOR DEL ACUEDUCTO de Nîmes, el *specus* (*el que vemos corresponde al puente del Gard*), se parece al de otros acueductos romanos. El agua se deslizaba sobre un fondo (el encachado) compuesto por una gruesa capa de mortero de cal y grava. Dos muros de lanchas verticales, separados 1,20 metros, se elevan hasta 1,80 metros en ciertos lugares. Las aguas, que llegaban a veces a lamer la parte más alta, dejaron depósitos calcáreos en las paredes. En el puente del Gard, el canal está cubierto por losas; en todo el resto, la cubierta es una bóveda de cañón. La estanqueidad estaba asegurada por un mortero de teja. Las aberturas son recientes.

(el fondo) estaba formado por una gruesa capa de mortero de cal y canto, sobre cuyos bordes se elevan dos pies derechos (muros laterales) compuestos por piedras verticales pequeñas. La anchura y la altura del canal, similares a las de otros acueductos, permiten acceder a su interior para los trabajos de mantenimiento.

Los acueductos urbanos estaban siempre cubiertos, para proteger el agua de los animales y de las extracciones ilícitas. El de Nîmes está coronado por una bóveda de cañón en todo su trayecto, excepto en el puente del Gard, donde lo cierran losas. La estanqueidad de la conducción estaba asegurada por la aplicación de un mortero de color rojo, una mezcla de cal grasa (que aumenta de volumen en contacto con el agua) y tejas de arcilla roja pulverizadas. Las paredes del canal estaban revestidas de una capa de ocho a diez centímetros de espesor de este mortero. El encachado, que sin duda era lo suficientemente estanco, no estaba recubierto. Sólo el

UN MODELO DE SOLIDEZ

A PESAR DE HALLARSE BIEN CONSERVADO tras casi veinte siglos de existencia, el puente del Gard ha sufrido el ultraje irreparable de los años. Bajo el efecto de su propio peso, los bloques, alterados por la intemperie, ensamblados sin mortero, se han ido desplazando imperceptiblemente. Para garantizar la conservación del monumento es necesario impedir la caída de bloques, localizar los puntos más frágiles y reforzarlos. A tal fin, se ha determinado el conjunto de cargas y presiones que se ejercen sobre la obra. En colaboración con Frédéric Dubois y Gilles Saussine, de la Universidad de Montpellier, hemos puesto a punto un modelo que visualiza esas fuerzas y presiones a que está sometida cada parte del puente del Gard, para deducir a partir de ahí su comportamiento.

Los edificios de este tipo requieren un tratamiento particular. Debido a la ausencia de mortero (si se exceptúan las hiladas sobre los arcos del tercer piso), resulta ilusoria la pretensión de estudiar la construcción mediante modelos continuos, como si el conjunto de arcos y pilares constituyera una sola pieza. Es necesario recurrir a modelos discretos. Entre los distintos tipos de modelizaciones por bloques, hemos escogido el método de la dinámica no regular de los contactos, desarrollado por Jean-Jacques Moreau, de la Universidad de Montpellier, y Michel Jean, del Laboratorio de Mecánica y Acústica de Marsella, recientemente adaptado a cálculos tridimensionales.

Para modelizar de forma realista las cargas de cada bloque hubo primero que definir sus formas. Con ayuda de arquitectos y de arqueólogos, hemos integrado los datos tomados de la geometría de la superficie y los que se han ido acumulando tras las campañas de restauración del monumento. Gracias a programas de gráficos nos ha sido posible determinar, para cada bloque, los datos geométricos que requería el cálculo (coordenadas de los vértices, propiedades de inercia en un marco de referencia ligado al bloque, posición de su centro de gravedad en un marco global, etc.) Al final, se respeta la disposición de los bloques, exceptuados los elementos salientes, que soportaron durante la construcción las cimbras y los tornos de elevación, pero carecen de influencia mecánica notable sobre la obra. La parte superior de mampostería está representada mediante bloques virtuales, reagrupación de varias piedras. El modelo comprende un total de 34.843 bloques, casi tantos como el monumento. Hasta ahora sólo se habían realizado modelos con varias docenas de bloques.

Para determinar la posición de equilibrio local de cada bloque, respetando el equilibrio de la estructura, el programa informático de simulación de cargas ha de calcular los contactos entre cada bloque y su vecino. Hemos considerado rozamientos “en seco”. Sus parámetros relativos los hemos determinado por medio de ensayos de cizalladura en el laboratorio. Esas pruebas se han realizado con muestras pétreas de la misma naturaleza que las del puente-acueducto y de idéntico comportamiento mecánico; para obtenerlas, contamos con la colaboración de geólogos. Nuestras simulaciones, además, tienen en cuenta el estado de rugosidad de la superficie resultante de las técnicas de tallado con pico utilizadas en la época.

Para introducir las cargas en el modelo convendría simular el orden de colocación de las piedras y, sobre todo, la situación de los bloques que componen los arcos —las dovelas— en el momento de retirar las cimbras. Sin embargo, como desconocemos la secuencia precisa de la construcción, y dado que su influencia se ha vuelto despreciable al cabo de 20 siglos, hemos simulado la introducción de las cargas en la estructura en un solo tiempo. El cálculo indica los desplazamientos de las piedras y la evolución del número de contactos, así como las cargas y presiones sobre cada bloque.

ángulo formado por el encachado y los pies derechos estaba reforzado por un relleno a modo de burlete. Para completar la impermeabilización, se cubría con un revoco liso y rojo el mortero de cal y tejas pulverizadas. Plinio el Viejo aseguraba que contenía tocino de cerdo, higos y vino, pero un análisis químico ha demostrado que el color rojo se lo debía al óxido férrico.

Dependiendo del paraje, se perforó el acueducto en la roca, se mamposteó sobre el suelo o lo alzaron sobre arcadas. De los 50 kilómetros de longitud total, su canal se halla enterrado en una treintena de kilómetros, corre a flor de tierra en una decena, se alza sobre muros, arcos o puentes a lo largo de otra decena y tiene casi 600 metros de túneles que atraviesan colinas. De tanto en tanto, unos registros permitían el acceso al canal a los trabajadores de mantenimiento. Se conocen algunas docenas. Su distribución parece aleatoria: según los tramos, la separación entre ellos varía de una quincena de metros hasta un centenar.

El agua corría de forma natural, por efecto de la gravedad, gracias a la ligera pendiente del canal. La elección del manantial era todavía más importante que la distancia que había que salvar o los obstáculos que debían franquearse: el agua tenía que ser pura, abundante, regular y estar a una elevación suficiente. Tras minuciosas investigaciones, los romanos se decidieron por los manantiales de Eure, en Uzès. Situados a una elevación de 73 metros, ofrecen un caudal regular de unos 400 litros por segundo en promedio. Los romanos tenían la costumbre de aumentar el rendimiento de los manantiales mediante drenajes subterráneos, para después canalizar el agua hasta un aljibe, donde se decantaba antes de entrar en el acueducto. Los sondeos han revelado pozos y un sistema de galerías de drenaje en las inmediaciones de las fuentes de Eure, pero no podemos afirmar que se trate de una instalación romana. No se han podido encontrar los 100 primeros metros de canal ni el punto exacto de toma del agua.

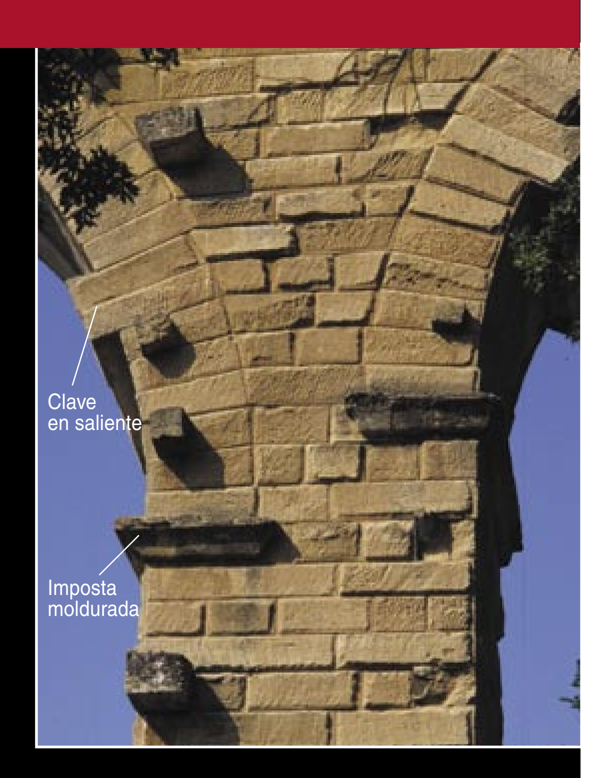
Los obstáculos del terreno

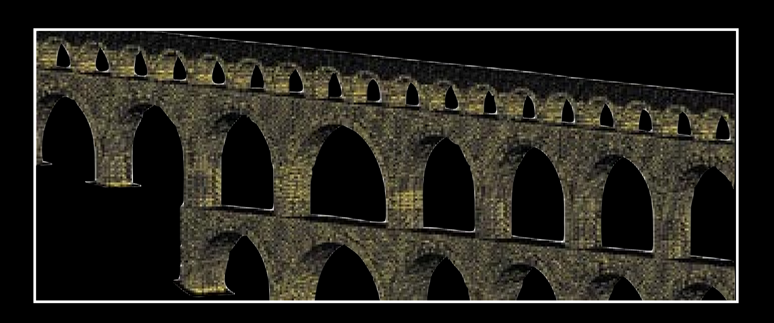
Elegido el manantial, los ingenieros romanos tuvieron que determinar un trazado que ofreciese una pendiente suave y regular del canal. Si la pendiente era fuerte, el agua corría con demasiada velocidad y erosionaba la conducción o destruía las instalaciones de recepción; en el caso contrario, se estancaba y se acumulaban limos. Además, los ingenieros evitaron cuanto les fue posible la construcción de puentes y de túneles, lo que obligó a largos desvíos. La distancia de Nîmes a Uzès es de sólo 20 kilómetros en línea recta, pero era imposible atravesar en línea recta las garrigas, que alcanzaban una altitud de 200 metros. No se podía considerar sino un recorrido sinuoso que aprovechase las depresiones del relieve (*véase la figura 2*). Al principio, el acueducto

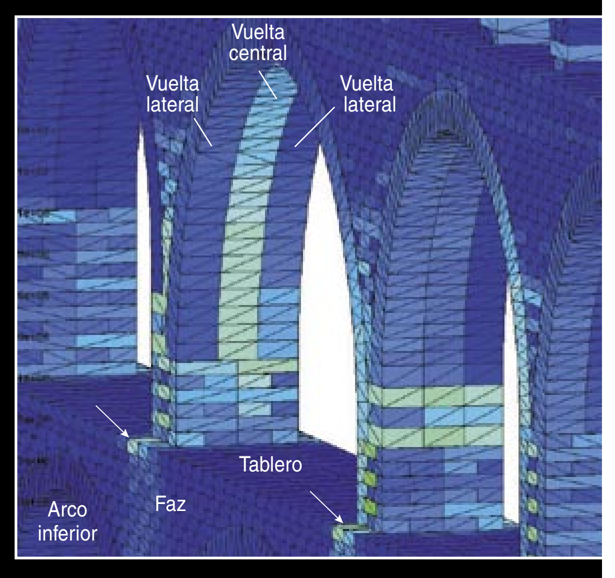
Los resultados han puesto de manifiesto una desigual repartición de los esfuerzos. En particular, la vuelta central de los arcos de la segunda hilera soporta la mayor parte del esfuerzo aplicado por los pilares del nivel superior: está más cargada que las vueltas laterales. De igual manera, el tablero (la parte horizontal) del primer nivel sufre mayor carga en la base de los pilares de la segunda hilera que entre los pilares. La comparación de estos resultados con los criterios de rotura de la piedra del puente del Gard establecidos en el laboratorio han identificado los bloques más propensos a fracturarse. Estos trabajos han conducido a la sustitución de algunas decenas de bloques en el conjunto del edificio.

El programa permite el estudio del comportamiento dinámico del puente. La dificultad reside en habérselas con el número de bloques y sus contactos durante el cálculo, ya que algunos podrían desprenderse. Hemos simulado el impacto que produciría en el edificio una sacudida sísmica de dos segundos de duración y una intensidad de grado 3 en la escala de Richter: habría bloques que, infaliblemente, se desprenderían.

MARC VINCHES y BRAHIM CHETOUANE
Centro de Materiales de Gran Difusión. Escuela de Minas de Alès







LA MODELIZACION del puente del Gard se efectúa con 34.843 bloques (*arriba a la izquierda*). Se estudian las fuerzas que ejercen los bloques vecinos sobre cada uno de ellos. Se ha respetado la disposición de cada uno de los bloques de los pilares, exceptuados los elementos salientes (*arriba a la derecha*). Los resultados de la puesta en carga del modelo revelan una repartición desigual de los esfuerzos sobre los diferentes bloques de piedra. En particular, la vuelta central de los arcos soporta los esfuerzos correspondientes a los pilares del nivel superior. Los esfuerzos más intensos se han representado en verde; los menos intensos, en azul oscuro. De igual manera, los bloques del tablero sufren mayor carga bajo los pilares (*flechas*) que entre los pilares.

J. L. PAILLET/IRAA-CNRS (*arriba*); MARC VINCHES/ESCUELA DE MINAS DE ALES (*centro y abajo*)

aprovecha el valle del Alzon, adosado al flanco sur de las garrigas de Uzès. La dificultad principal del recorrido sobreviene en el cambio de vertiente entre las garrigas de Uzès y de Nîmes. El acueducto no sólo tiene que franquear el valle del Gardon, sino también numerosas cañadas y pequeños puertos, que obligaron a construir tres puentes de arco simple y dos puentes de dos pisos, de 24 metros de altura. Sólo ese tramo exigió casi dos kilómetros de canalización aérea. El acueducto se apoya seguidamente sobre el flanco este de las garrigas de Nîmes para alcanzar la ciudad.

Los ingenieros no dudaron en perforar de un lado a otro las partes elevadas. En Sernhac, una zona de canteras obligó a perforar túneles de 93 y 77 metros; a la entrada de Nîmes, un túnel de 400 metros bajo el puerto de la Croix de Fer evita tener que contornear el monte Duplan a lo largo de 1500 metros. El trazado del acueducto exigió también desecar la laguna de Clausonne, que define la divisoria entre las vertientes de las cuencas del Gardon y del Vistre. Para evitar ese límite, a demasiada altitud, habrían tenido que ir flanqueando durante casi 20 kilómetros la meseta de Costières du Gard, que se alza por el este. Los ingenieros romanos prefirieron atravesar 400 metros de una zona más alta que los manantiales de Eure y tender el acueducto por las orillas de la charca. Para ello, tuvieron que excavar zanjas de seis metros de profundidad. Desecaron la ex-



tensión de agua estancada para que no contaminase el agua corriente del acueducto.

Para trazar el canal, los ingenieros disponían de dos instrumentos poco precisos, la groma y el corobates. Aun así, y pese a las dificultades del terreno, los topógrafos lograron obtener una pendiente poco pronunciada y precisa. Se ha medido con sondeos la altitud del encachado en diversos puntos clave del recorrido y se han corregido las medidas de declive del acueducto obtenidas en el siglo XIX. El punto más elevado del canal, situado a un centenar de metros del que se supone fue su punto de arranque, se encuentra a una altitud de 71 metros. A la salida del puente del Gard, el encachado se sitúa a 65 metros, y desciende sólo a 64 metros en la laguna de Clausonne. Finalmente, la llegada al *castellum*, o castillo del agua, de Nîmes se halla a 58 metros. Entre el punto de partida y el *castellum*, el agua recorre 49.987 metros y desciende 12. La pendiente media es de 24 centímetros por kilómetro, una proeza técnica. Entre todos los acueductos romanos, el canal de Nîmes es el que presenta una pendiente media más pequeña.

Una precisión extraordinaria

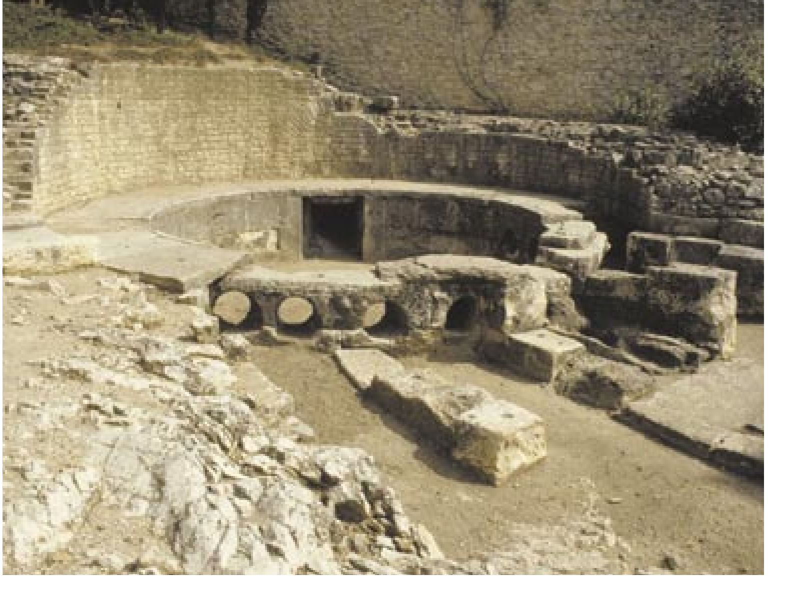
Cuando se examina con detalle el perfil del acueducto, se constata que esta pendiente no es constante. La canalización presenta una serie de rellanos de varios kilómetros, en los cuales el desnivel es de menos de diez centímetros por kilómetro, separados por tramos más cortos donde la pendiente alcanza en ocasiones los 4 metros por kilómetro. Los rellanos ocupan casi la mitad del trayecto. Esta segmentación en tramos sucesivos consiente una regulación mediante represas y compuertas sin que ello entrañe una excesiva acumulación de sedimentos. Excavaciones recientes han demostrado la existencia de dos aljibes de regulación, uno a la salida de las fuentes, el otro a la entrada del puente del Gard (*véase la figura 4*). La pendiente también estuvo sujeta a restricciones de carácter técnico. A causa del cambio de vertiente entre las dos garrigas, había que descender rápidamente hasta la altura mínima posible en el encuentro con el Gardon, para limitar la altura de las obras de ingeniería, y en particular, la del puente del Gard. La pendiente media aguas arriba de éste es por eso igual a 36,8 centímetros por kilómetro, mientras que aguas abajo se reduce a la mitad. Por otra parte, era necesario también no descender demasiado, para poder franquear el límite entre las dos vertientes. Entre el puente del Gard y la laguna de Clausonne, el canal cae solamente ocho centímetros por kilómetro. El proyectista recuperó la diferencia entre las pendientes antes y después de la laguna al hacer pasar el acueducto por zanjas de seis metros de profundidad.

Víctima de la cal

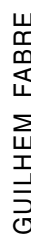
A pesar de la descripción precisa de la pendiente y del estudio de los manantiales de Eure, se ignora cómo evolucionó el caudal del acueducto en el transcurso del tiempo. La sección máxima de la corriente de agua, a la altura de los pies rectos, es de 1,40 metros cuadrados. El caudal, durante el período de funcionamiento óptimo, es sensiblemente igual al suministrado por las fuentes, es decir, una media de 400 litros por segundo (35.000 metros cúbicos al día). Este volumen es, por otra parte, igual a la capacidad máxima del castillo del agua en la recepción. Se producían variaciones de carácter diario y de carácter estacional. El caudal máximo de los manantiales de Eure en crecida se aproxima a 117.000 metros cúbicos al día. El acueducto estaba concebido de forma que los servicios municipales pudiesen almacenar provisionalmente el agua y modular el caudal para evitar las obstrucciones y el despilfarro nocturno, y atenuar los déficit de suministro en los períodos de sequía. El tiempo de tránsito entre Uzès y Nîmes, que era al principio de 24 horas, no tardó en ser de cuatro días.

Y es que el canal de Nîmes, al igual que todos los acueductos romanos, fue víctima de la calidad de las aguas que conducía. En su caso, al ser muy calcáreas, formaron concreciones que fueron poco a poco cegando la conducción. Se ha estimado en 35.000 metros cúbicos el volumen de los depósitos calcáreos, es decir, cerca de 80.000 toneladas. La distribución de tales depósitos es muy desigual: mientras que en Gisfort no pasan de unos cuantos milímetros, alcanzan un espesor de 50 centímetros en Sartannette, casi la mitad de la anchura del canal. En ciertos lugares, la sección del canal se redujo a casi la mitad. El caudal de la traída disminuyó rápidamente, para quedar en unos 10.000 metros cúbicos diarios al final de su explotación. Además de esta disminución había que contar con las pérdidas por fugas y robos, que convierten en inciertas las estimaciones del consumo de agua en Nîmes. Podemos suponer que a principios del siglo II, cada uno de los alrededor de 50.000 habitantes de Nîmes consumía unos 400 litros diarios, o sea, un total de 20.000 metros cúbicos al día. Esta cantidad es pequeña con respecto al rendimiento óptimo del acueducto, pero no podemos dejar olvidadas las aguas sobreras que rebosaban permanentemente de las fuentes y lavaban todas las ciudades romanas.

Los depósitos calcáreos fueron poco a poco cegando el acueducto de Nîmes. Sin embargo, merced a este recuerdo del pasado, arqueólogos e hidrólogos han podido recomponer la historia del acueducto. Un análisis de la estructura y composición de las sucesivas capas y de sus discontinuidades ha llevado a reconstruir las



4. EL CASTILLO DEL AGUA en Nîmes (*sobre estas líneas*) se conocía desde hacía mucho, pero las excavaciones recientes han sacado a la luz dos aljibes de regulación, uno en el valle de Eure, en el arranque del acueducto (*página precedente*), y el otro, en Balozière, en la entrada al puente del Gard. Estos depósitos permitían modular el caudal. Seguramente existirían otros aljibes parecidos.


GUILHEM FABRE

etapas de utilización del acueducto y evaluar durante cuánto tiempo funcionó. Por otra parte, las veladuras de cal y las estalagmitas observables bajo los arcos de los puentes de Vers y de Remoulins nos informan de las fugas, que debían de ser considerables. La excepcional conservación de los vestigios nos ha permitido cartografiar el recorrido del acueducto en su totalidad e identificar muchos tipos arquitectónicos correspondientes a los estadios de construcción, utilización y abandono del acueducto. Combinando estas observaciones con los datos topográficos hemos reconstruido la agitada historia del acueducto.

La agitada historia del acueducto

Se creyó durante mucho tiempo que la construcción del puente del Gard fue debida a una iniciativa de Agripa, brazo derecho del emperador Augusto, en el segundo decenio antes de nuestra era, pero hoy se la considera más tardía. Las excavaciones realizadas en los dos túneles de 80 metros de longitud que atraviesan las canteras de Sernhac han revelado que el frente de corte del acueducto es de un tipo posterior a los característicos de los comienzos del Imperio. La construcción inicial presenta una gran unidad arquitectónica. Los puentes modestos están constituidos por pequeños bloques de piedra; los más impresionantes exhiben pilares con tajamares o claves numeradas. Gracias a los fragmentos de recipientes cerámicos recogidos en los estratos correspondientes a la construcción de los pilares de los puentes y, allí donde el canal estuvo enterrado, en los rellenos sobre su bóveda, situamos la construcción hacia mediados del siglo I de nuestra era, en el reinado de los emperadores Claudio o Nerón.

El acueducto presentó, desde su construcción, ciertas deficiencias que exigieron retoques. Ya tras la primera toma de agua, el nivel superaba en el sector del puente del Gard la altura de la acequia, debido a la escasa pendiente y a lo muy sinuoso del trazado. La estanqueidad, por otra parte, no quedaba asegurada, por la carencia de mortero en el encachado. Aparecieron enseguida veladuras calcáreas en las paredes exteriores, todavía visibles bajo el último nivel del puente antes de que fuera limpiado en el siglo XIX. Hubo, pues, que efectuar obras de consideración para la mejora de la estanqueidad. La altura del canal se aumentó en unos 60 centímetros a lo largo de seis kilómetros, entre la colina de Martian, en Vèrs, y la salida del bosque de Remoulins. En el propio puente del Gard, hubo necesidad en estos trabajos de añadir una hilada de aparejo medio (de piedras alrededor del doble de largas que altas) bajo las losas de cobertura, como marca el nítido borde entre dos capas de enlucido rojo. Ese aumento de la altura obligó, sobre todo, a la demolición y reconstrucción de la bóveda en las partes enterradas, y a reforzar los pilares de los puentes para que soportasen las sobrecargas debidas al mayor tamaño del canal.

Aguas arriba, se cegaron muchos de los arcos de los puentes de arcadas continuas de Vers; a pesar de ello, no se realzó el canal. Sin embargo, hubiera sido necesario, pues el canal pasó rápidamente, cuando cobraron importancia las concreciones calcáreas, a funcionar en conducción forzada. En Remoulins y Sernhac, las discontinuidades en las primeras capas de depósitos, que son de caliza clara y dura, señalan las interrupciones de suministro necesarias para efectuar trabajos de reparación. Se aprecian dos períodos de interrupción, a pesar de que sólo fue necesario dejar en seco la conducción durante el realzado. Es posible que la obra se realizara en dos fases. Si se acepta la hipótesis actual de un depósito de 1,5 milímetros al año, el flujo hidráulico debió de cortarse, primero a los 6, y después, a los 18 años de funcionamiento: el período de puesta a punto duró, pues, alrededor de un cuarto de siglo.

Tras esta fase de mejoras el canal operó a pleno rendimiento durante casi un siglo y medio, estrictamente vigilado y cuidado por sus administradores. Este período ha dejado escasos testimonios arqueológicos, con la excepción de las concreciones posteriores al segundo vaciado. Doscientos diez milímetros de depósitos calcáreos claros, duros y estratificados en haces regulares sugieren que el acueducto vio correr aguas puras durante unos 140 años. A lo largo de ese intervalo, se fueron limpiando los lodos decantados en el fondo, pero los romanos dejaron que la cal se acumulase en las paredes.

A partir de la primera mitad del siglo III, los depósitos se vuelven terrosos, más blandos e irregulares; la pureza del agua se había alterado. La obra no recibe ya un mantenimiento regular. Su caudal se reduce considerablemente. La vegetación, que durante todo el período de buen funcionamiento estuvo reducida a trazas, acelera su propagación. En el interior, las concreciones encierran huellas de raíces. La mayor parte de las veladuras y estalagmitas datan de esta época. El agua se derivaba en ciertos puntos para el riego de los campos adyacentes. Como la ciudad no posee ya medios para cuidar la conducción, el agua se utiliza en los cultivos. En torno a unos andamiajes de madera que soportaban una conducción para el riego se formaron siete pilas de concreciones calcáreas, de 100 a 250 metros cúbicos cada una, abrazadas a los puentes de arcadas de Vers; dan testimonio de las captaciones practicadas en la pared del

acueducto. En la Antigüedad tardía, el acueducto sirvió para el riego.

El canal quedó destruido en la parte central del puente del Lône en el siglo IV, tal vez a causa de un movimiento sísmico. Fue reconstruido poco después y recibió nuevos cuidados, a pesar de su capacidad reducida. Se erigieron nuevos contrafuertes en los puentes de Remoulins; se cegaron algunos arcos para reducir las fugas de agua. En ciertos puntos se aplicó un nuevo mortero de cerámica, echado sobre los ya gruesos depósitos del fondo del canal. Se suprimió el sistema de riegos. Se ignora el motivo por el que se efectuó esta restauración.

No duró mucho remozado. La formación de depósitos calcáreos cesa a comienzos del siglo VI: el acueducto debió de ser abandonado tres siglos antes de lo que se creía hasta ahora. En esta época, la región se había convertido en territorio fronterizo entre los francos, instalados en Uzès, y los visigodos, en Nîmes. Sin embargo, nada permite afirmar que se pusiera el acueducto fuera de servicio de manera deliberada; hacía mucho que su caudal era muy reducido. La conducción inicia entonces una segunda vida: sirvió de cantera durante toda la Edad Media románica. En la necrópolis de Saint-Baudile, en Nîmes, se han encontrado concreciones arrancadas del canal utilizadas como cubiertas de sarcófagos; serán empleadas también en la construcción de iglesias y castillos en las localidades vecinas. También los puentes se destinan a otro fin: en el siglo XII, los pilares del puente del Gard son recortados 50 centímetros para permitir el paso de carretas, y en el siglo XVIII el ingeniero Pitot adosará un puente de carretera.

En el Segundo Imperio se empezó a prestar atención a la historia del acueducto de Nîmes, pero ha habido que esperar hasta comienzos del siglo XXI para que se reconstruya por fin la historia de esta obra maestra de la arquitectura hidráulica, que admite la comparación con las de Roma, Colonia o Cartago.

Los autores

Guilhem Fabre, geógrafo y geólogo, y **Jean-Luc Fiches**, arqueólogo, trabajan en el Laboratorio de Arqueología de las Sociedades Mediterráneas de la Universidad de Montpellier 3. **Jean-Louis Paillet** es arquitecto del Instituto de Investigación de la Arquitectura Antigua del CNRS (Centro Nacional de Investigaciones Científicas), en Aix-en-Provence.

Bibliografía complementaria

LE PONT DU GARD, L'EAU DANS LA VILLE. G. Fabre, J.-L. Fiches y J.-L. Paillet. Patrimonio del presente. Caisse Nationale des Monuments Historiques & CNRS Édition; París, 1992.

L'AQUEDUC DE NÎMES ET LE PONT DU GARD. ARCHÉOLOGIE, GÉOSYSTÈME, HISTOIRE. G. Fabre, J.-L. Fiches y J.-L. Paillet. CNRS Édition; París, 2000.



1. EL ACTUAL DILUVIO de información que padece quien busca en Internet quedará reducido a un goteo bien dirigido cuando entren en servicio nuevos buscadores que tendrán en cuenta el contexto de uso: las interacciones habituales del usuario con el sistema, el lugar donde se encuentra, etc.

Nuevos buscadores en la Red

Hoy, los buscadores en la Red nos inundan con respuestas superfluas, pero no tardaremos en disponer de herramientas más perfectas, que se adaptarán a nuestros intereses

Javed Mostafa

En menos de diez años, los buscadores en Internet han cambiado por completo la manera de recabar información. Ya no hay que ir a una biblioteca: obtendremos documentación pertinente con sólo pulsar unas cuantas teclas. Ahora que "investigar" es sinónimo de "buscar con Google", los motores de búsqueda en la Red están recibiendo una serie de perfeccionamientos que los potenciarán aún más.

Para aumentar su eficacia, los nuevos buscadores mejoran la calidad de sus resultados escudriñan más hondamente en el repertorio de materiales disponibles en línea, clasifican y exponen los resultados de formas más idóneas y recuerdan nuestros intereses más constantes al objeto de afinar el tratamiento de nuevas peticiones de información. En el futuro, los motores de búsqueda llevarán más lejos también el horizonte de los contenidos accesibles y no se limitarán al mero procesamiento de unas cuantas palabras clave tecleadas en un recuadro de texto. Tendrán en cuenta —de forma automática— el lugar donde se encuentra el usuario y se encargarán, por ejemplo, de que su ayudante digital personal inalámbrico localice el restaurante más cercano cuando viaja por carretera. Nuevos sistemas permitirán también encontrar más rápidamente la imagen que deseamos comparando bocetos trazados a mano con formas o figuras similares. Encontrarán incluso el nombre de esa canción que tenemos medio olvidada con que tarareemos unos cuantos compases.

Los motores de búsqueda actuales hunden sus raíces en un campo, la recuperación de información, problema esencial en informática, que empezó a estudiarse hace casi 50 años. En un artículo de *Scientific American* publicado en 1966, titulado "Almacenamiento y recuperación de información", Ben Ami Lipetz explicaba que las más avanzadas técnicas de manejo de la información de aquellos tiempos sólo afrontaban tareas rutinarias o administrativas. Lipetz concluía señalando, con gran perspicacia, que no se lograrían auténticos progresos mientras no se comprendiese mejor la forma en que las personas procesamos la información y no se dotara a las máquinas de capacidades similares. Es obvio que los ordenadores no han alcanzado todavía tal grado de perfección, pero sí es cierto que, al realizar ciertas tareas, atienden en mayor medida a los intereses, necesidades y hábitos personales de quienes los utilizan.

Preselección de páginas

Antes de exponer desarrollos nuevos en este campo, conviene recordar cómo funcionan los buscadores actuales. ¿Qué ha ocurrido cuando leemos en la pantalla que Google ha escrutado miles de millones de documentos en, por ejemplo, 0,32 segundos? Dado que la comparación, una por una, de las páginas de la Red con las palabras clave facilitadas por el usuario duraría demasiado, los sistemas de búsqueda han efectuado ya una serie de operaciones cruciales mucho antes de que el usuario llegue a formular su petición.

En primer lugar, se identifican en las páginas contenidos que puedan ser objeto de busca y se los guarda en una base de datos actualizada sin cesar. Se utilizan unos programas especiales "arrastradores" (o *crawlers)* para explorar las páginas publicadas en la Red, acceder a ellas junto con las que tengan vinculadas y organizarlas en una única ubicación. En un segundo paso, el sistema cuenta palabras que sean relevantes y establece su importancia mediante diversas técnicas estadísticas. En tercer lugar, se genera a partir de los términos relevantes una estructura de datos muy eficiente —un árbol— que asocia estos términos con páginas concretas de la Red. Al serle

NEIL BRENNAN

presentada al sistema una petición, explora solamente el árbol así construido —llamado árbol índice— y no las páginas individuales de la Red. La búsqueda parte de la raíz del árbol índice; en cada paso se examina una rama (que representa muchos términos y las páginas de la Red asociadas) y se prosigue la búsqueda por ella, o se la abandona. De este modo, el tiempo de búsqueda se reduce de forma exponencial.

Para situar los registros relevantes (o enlaces) en la cabecera de la lista o cerca de ella, el algoritmo de búsqueda aplica varias estrategias de clasificación. Una de las habituales —el producto de la frecuencia del término en el documento por el logaritmo de la inversa de la fracción de documentos en que aparece— se basa en la distribución y frecuencia de las palabras, y genera una serie de pesos numéricos que denotan la importancia de las palabras correspondientes en documentos individuales. A las palabras muy frecuentes (“o,” “para,” “con”), o a las que aparecen en muchos documentos, se les asigna un baremo mucho menor que a las palabras de mayor relevancia semántica o que aparecen en un número escaso de documentos.

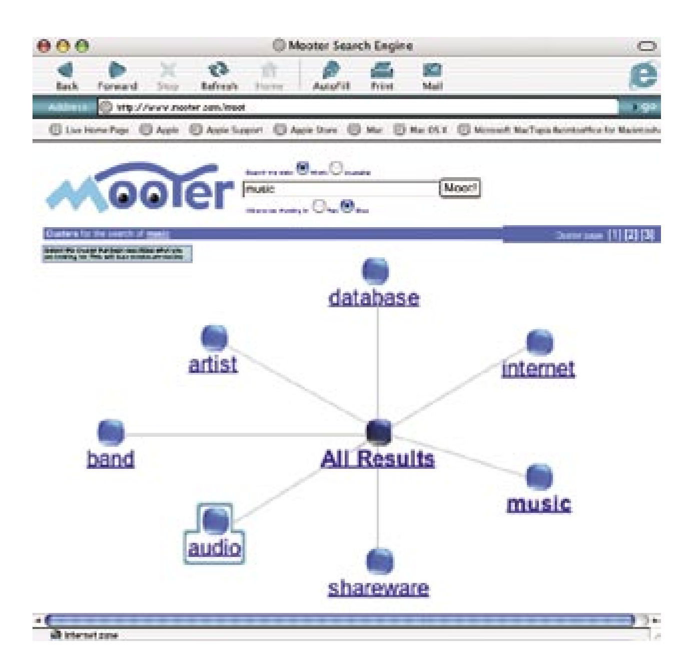
Además de la baremación de términos, existen otras estrategias para la ordenación de páginas de la Red. En el análisis de enlaces, por ejemplo, se valora la naturaleza de cada página en función de sus asociaciones con otras páginas. La página puede ser una “autoridad”, en razón del número de páginas que llevan a ella, o un “distribuidor”, por el número de páginas hacia las que encamina. En Google se utiliza el análisis de enlaces para perfeccionar la ordenación de los resultados de las búsquedas.

Motores más potentes

Google, en los seis años que ha tardado en ocupar la posición dominante, ofrecía dos ventajas críticas sobre sus competidores. La primera, las ingentes tareas de recopilación de datos efectuadas por sus programas de exploración de la Red. Segunda, sus métodos de indexación y ponderación ordenaban mejor los resultados. No obstante, los constructores de motores de búsqueda han desarrollado recientemente sistemas nuevos, de eficacia similar, algunos de los cuales superan a Google en ciertos aspectos.

Resumen/*Más allá de Google*

- La veloz proliferación de sitios en la Red hace necesarios buscadores más precisos, que encuentren antes y con mayor eficacia lo que se desea hallar.
- Los buscadores por venir perfeccionarán sus resultados: ahondarán en los materiales existentes en línea, clasificarán y expondrán mejor sus hallazgos; prestarán atención a los intereses del usuario con el fin de dar una respuesta más eficaz a las futuras búsquedas. Programas de nueva factura se encargarán de rastrear la ubicación del usuario y de manejar no sólo texto, sino también material sonoro o gráfico.
- Nuevas formas de negocio acabarán por abrir a la búsqueda “inteligente” casi toda la información publicada en forma digital —sea texto, audio o vídeo— no disponible en la Red actualmente.



2. MOOTER, un nuevo motor de búsqueda, facilita la evaluación de resultados al categorizar la información recopilada y agrupar los sitios relacionados en botones que cabe marcar en la pantalla. El agrupamiento central, que corresponde al tema general, está rodeado por botones que representan subcategorías. Al pulsar uno de ellos se recuperan listas y aparecen nuevos agrupamientos asociados.

Gran parte de los contenidos digitales siguen hoy siendo inaccesibles porque muchos de los sistemas que los conservan y gestionan no almacenan las páginas en la forma en que suelen verlas los usuarios. Dichos recursos generan páginas preparadas con el formato Web sólo cuando los usuarios las solicitan y mientras interactúan con ellas. Los programas de exploración de la Red típicos no saben cómo proceder con estos recursos y no logran recuperar contenido alguno. Así se mantiene una ingente cantidad de información oculta a los usuarios —quizás, unas 500 veces el volumen de la Red corriente, según ciertas estimaciones—. Se está intentando que la búsqueda en la “Red invisible” sea tan sencilla como la exploración de la parte visible.

Con este propósito, se ha creado una nueva clase de programas, los “envoltorios” (*wrappers*, porque sólo por su mediación puede accederse a los programas ocultos que “envuelven”). Se basan en que la información de la Red suele ofrecerse mediante estructuras “gramaticales” normalizadas. Para desarrollar su tarea, los programas envoltorio siguen diversos procedimientos. Algunos aprovechan la sintaxis habitual de las solicitudes de búsqueda y de los formatos estándar de los recursos en línea para abrirse paso hasta contenidos ocultos. Otros sacan partido de las “interfaces para la programación de aplicaciones”, gracias a las cuales los programas interactúan merced a un conjunto también estándar de operaciones y comandos. Un ejemplo de programa que proporciona acceso a la Red oculta es Deep Query Manager, de Bright Planet. Este gestor de peticiones de búsquedas, un programa envoltorio, puede proporcionar

WWW.MOOTER.COM

portales “a la medida” y explorar las interfases de más de 70.000 recursos ocultos de la Red.

Una clasificación de resultados que fíe solamente en enlaces y palabras, y no restrinja los tipos de páginas que se están comparando, abre la posibilidad de trucar el sistema de clasificación y descarriar las búsquedas. Por ejemplo, si se ejecuta la petición “fracaso lamentable” (“miserable failure”) en los buscadores de Google y Yahoo, en el conjunto resultante de enlaces se encuentra en primera posición una de las páginas de whitehouse. gov, el sitio oficial de la Casa Blanca: la biografía de Bush (seguida por la de Carter y por el sitio de Michael Moore); en el de MSN la precede el sitio de Michael Moore y viene a continuación el de Hillary Clinton.

Otro novedoso motor de búsqueda, Mooter, que también utiliza técnicas de agrupamiento, proporciona algunas ventajas más, pues expone sus agrupamientos de forma gráfica (*véase la figura 2*). Para ello, sitúa los botones correspondientes a las subcategorías en torno a un botón central, a modo de radios de una rueda. Al pulsar uno de los botones se reciben listas de enlaces relevantes y nuevos agrupamientos asociados. Mooter “recuerda” los agrupamientos que van siendo seleccionados. Al pulsar la opción “refinar”, que combina los agrupamientos de la búsqueda que se han seleccionado previamente con la petición actual, se pueden obtener resultados más precisos todavía.

KartOO es un buscador parecido, que también utiliza grafismos. Se trata de uno de los llamados motores de metabúsqueda, que somete la petición del usuario a otros buscadores y proporciona resultados agregados en forma gráfica. Al lado de una lista de términos clave asociados con diferentes sitios, KartOO dibuja un “mapa”, que muestra, mediante iconos, los sitios importantes y, mediante caminos rotulados, las relaciones entre ellos. Cada uno de estos rótulos sirve para refinar más la búsqueda.

Otra de las formas en que los útiles informáticos van a simplificar todavía más las búsquedas consistirá en examinar no sólo la Red, sino también el contenido de los discos de nuestro ordenador. En la actualidad, para la exploración de los archivos guardados en el ordenador se requiere una aplicación aparte. Pero Google, por ejemplo, ha anunciado hace poco su Desktop Search, que conjuga ambas funciones y permite al usuario especificar para su búsqueda un disco duro, la Red o ambas cosas. Se espera que la próxima versión del sistema operativo de Windows, cuyo nombre clave es Longhorn, ofrezca, valiéndose de técnicas desarrolladas en otro proyecto de Microsoft, StuffI’veSeen, “búsquedas implícitas”, que recabaría informaciones importantes sin que el usuario tuviera que efectuar peticiones. Esa búsqueda implícita se basaría, según se ha informado, en la recopilación de palabras clave tomadas de la información textual manejada recientemente por el usuario, el correo electrónico, por ejemplo, o los documentos de Word. Tendría el propósito de localizar y presentar contenidos, relacionados con esas claves, que se encuentren en los archivos guardados en el disco duro. Es posible que Microsoft amplíe la función de búsqueda a contenidos de la Red y permita transformar más cómodamente en una petición cualquier contenido textual que aparezca en pantalla.

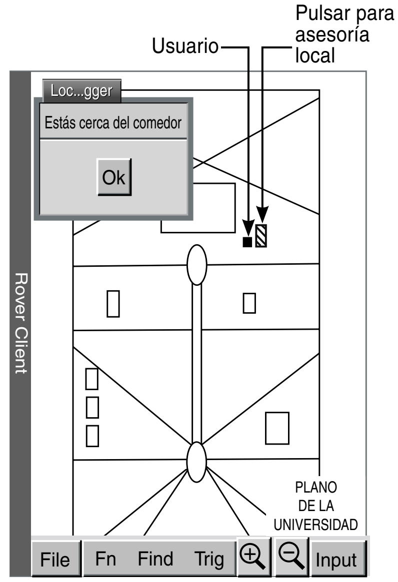
Búsquedas personalizadas

Recientemente, Amazon, Ask Jeeves y Google anunciaron unas iniciativas que tratan de mejorar los resultados de las búsquedas al conceder a los usuarios la posibilidad de adaptarlas a su gusto. El buscador de Amazon, A9.com, y el motor de búsqueda de Ask Jeeves, MyJeeves.ask. com, rastrean tanto peticiones como páginas recuperadas, además de permitir que se guarden permanentemente,



3. UN ENTORNO INFORMATICO sensible a la localización del usuario, como es el caso de Rover, de la Universidad de Maryland, hace posible que un dispositivo inalámbrico de mano conozca en todo momento su ubicación en un mapa. Esta propiedad permite que Rover facilite al usuario, mientras viaja, informaciones sobre los alrededores adaptadas a sus intereses.





MIND LAB, UNIVERSIDAD DE MARYLAND, COLLEGE PARK

a la manera de los "favoritos" de los navegadores. En MyJeeves, las búsquedas guardadas se pueden examinar y ejecutar repetidamente, lo que abre una vía para desarrollar un subconjunto de la Red organizado por el usuario. El buscador A9 de Amazon realiza funciones semejantes y se vale también de historias personales de búsqueda para sugerir posibles nuevas páginas. Esta función "de asesoría" se parece a la muy conocida recomendación de títulos en Amazon, que se basa en las pautas de búsqueda y adquisición de grupos de usuarios, proceso que se conoce como "filtrado cooperativo."

Los historiales de búsquedas en A9 y en MyJeeves no se conservan en las máquinas de los usuarios, sino en los servidores de los motores de búsqueda, para dejarlos a salvo y, de ese modo, recuperarlos posteriormente desde cualquier máquina que se utilice para búsquedas ulteriores.

Los usuarios del Google personalizado pueden especificar asuntos de su particular interés seleccionándolos de una jerarquía temática generada con anterioridad. Los usuarios pueden también especificar en qué grado están interesados por diversos temas o disciplinas. El sistema se vale seguidamente de los temas elegidos, del grado de interés manifestado y de la solicitud original para recuperar y ordenar los resultados.

Aunque estos sistemas de búsqueda ofrecen características nuevas de importancia, no constituyen sino perfeccionamientos graduales. Si los motores de búsqueda pudieran asumir la tarea, de mucho mayor vuelo, de tener en cuenta el contexto de la petición —es decir, los asuntos que han motivado búsquedas recientes del usuario, su comportamiento personal, los asuntos en que trabaja, etc.—, la utilidad de los buscadores aumentaría mucho. La determinación del contexto del usuario exigirá que los proyectistas de programas superen obstáculos formidables en la ingeniería informática, sin embargo. Habrán de construir, en primer lugar, sistemas que supervisen automáticamente los hábitos del usuario y los asuntos que le interesan, con el fin de que los motores puedan cerciorarse del contexto en que se está efectuando una búsqueda de información, el tipo de plataforma informática que se está utilizando y la forma en que, en general, el usuario utiliza el buscador. Una vez establecidos estos puntos, y situados en lo que se denomina un "perfil de usuario", los programas podrían suministrar información convenientemente adaptada. La adquisición precisa y el mantenimiento de la información sobre los usuarios quizá no resulte fácil. Pocos estarán dispuestos a soportar la molestia de proporcionar datos personales que no sean imprescindibles para sus actividades de búsqueda normales.

El registro de la forma en que alguien navega por la Red y de su interacción con las aplicaciones que utiliza de forma habitual en sus equipos, son buenas fuentes de información sobre los asuntos que le pueden interesar. Podrían crearse programas supervisores que rastreasen las actividades del individuo mientras juega o abre, lee, examina, imprime y comparte documentos, y que, sirviéndose de esta información, guiasen las búsquedas sobre determinados asuntos. Tal proceso recuerda la función de búsqueda implícita desarrollada por Microsoft. Los primeros sistemas que integran las búsquedas con perfiles de intereses de los usuarios deducidos de fuentes indirectas se llaman PowerScout y Watson. PowerScout, todavía un sistema de laboratorio, no se ha comercializado aún; parece, en cambio, que Watson será lanzado dentro de poco. Se están desarrollando en la actualidad programas más refinados, que recopilarán datos de la interacción a lo largo del tiempo para generar seguidamente, e ir modificando, un perfil de usuario que pronostique sus futuros intereses.

No obstante, las técnicas basadas en perfiles de usuario de estos sistemas no han recibido gran aceptación. Por varias razones; una, la dificultad de mantener un perfil preciso con respecto a tareas muy diversas y durante períodos prolongados. La determinación de perfiles robustos exige una reiterada evaluación. Los intereses del usuario pueden cambiar de formas tan sutiles como impredecibles y, por ello, afectar mucho a los resultados de las búsquedas.

Se ha de considerar también la protección de la intimidad. Los rastreos de la navegación por la Red de una persona, la conservación de sus búsquedas y sus pautas de interacción con distintas aplicaciones pueden revelar una importante cantidad de información personal confidencial; llegar incluso a revelar la identidad de esa persona. Existe un puñado de sistemas que permiten a los usuarios obtener de forma anónima contenidos de la Red. El método básico utilizado por estas herramientas consiste en valerse de servidores intermedios, a través de los cuales se transmiten y procesan las transacciones de un usuario, de forma que el sitio que alberga los datos o servicios sólo tenga noticia de esos sistemas interpuestos y no pueda seguir los pasos de una petición hasta un usuario individual. Ofrece un ejemplo de esta técnica anonymizer.com, que permite navegar de incógnito por la Red. O los programas Freedom Websecure, que se valen de varios servidores intermedios y de muchos estratos de encriptación. Si bien estas herramientas ofrecen un grado razonable de seguridad, no existen todavía servicios de búsqueda que permitan que el usuario adapte el sistema a su medida y garanticen al mismo tiempo una sólida protección de la privacidad. El equilibrio entre la salvaguarda de la intimidad y los beneficios que proporcionarían los perfiles de usuario sigue siendo un problema crucial.

De camino

Otra categoría de buscadores "conscientes del contexto" tendría en cuenta el lugar donde se encuentra la persona que los utiliza. Imaginémosla de vacaciones, con un ordenador de mano que reciba e interprete señales del sistema GPS de localización global o que se valga de radiofrecuencias para determinar y actualizar constantemente su posición. Se podría sacar partido de esa capacidad. A ese efecto se está desarrollando en la Universidad de Maryland un prototipo, llamado Rover. Se vale de servicios de texto, audio y vídeo que cubren una extensa región geográfica (*véase la figura 3*). Puede presentar mapas de zonas cercanas en los que resalta puntos de posible interés. Su facultad de identificar automáticamente dichos puntos se basa en aplicar al mapa diversos "filtros" específicos asociados al asunto que interese.

El sistema proporciona también información complementaria. Si, por ejemplo, un cliente de Rover estuviera

visitando un museo, el ordenador de mano podría mostrarle el plano de la planta de la institución y de las exposiciones cercanas. Al salir al exterior, la pantalla pasaría a mostrar un plano de la zona y señalaría lugares de posible interés. Rover admitiría asimismo que su operador le diese directamente su posición y recuperase información de la base de datos conectada en red. El grupo creador de Rover y una empresa de servicios de red, KoolSpan, recibieron en 2003 fondos del estado de Maryland para desarrollar conjuntamente aplicaciones orientadas a la identificación de usuarios y al suministro inalámbrico de datos con garantías de seguridad. Tal colaboración debería fructificar en una versión de Rover más segura y comercialmente aceptable.

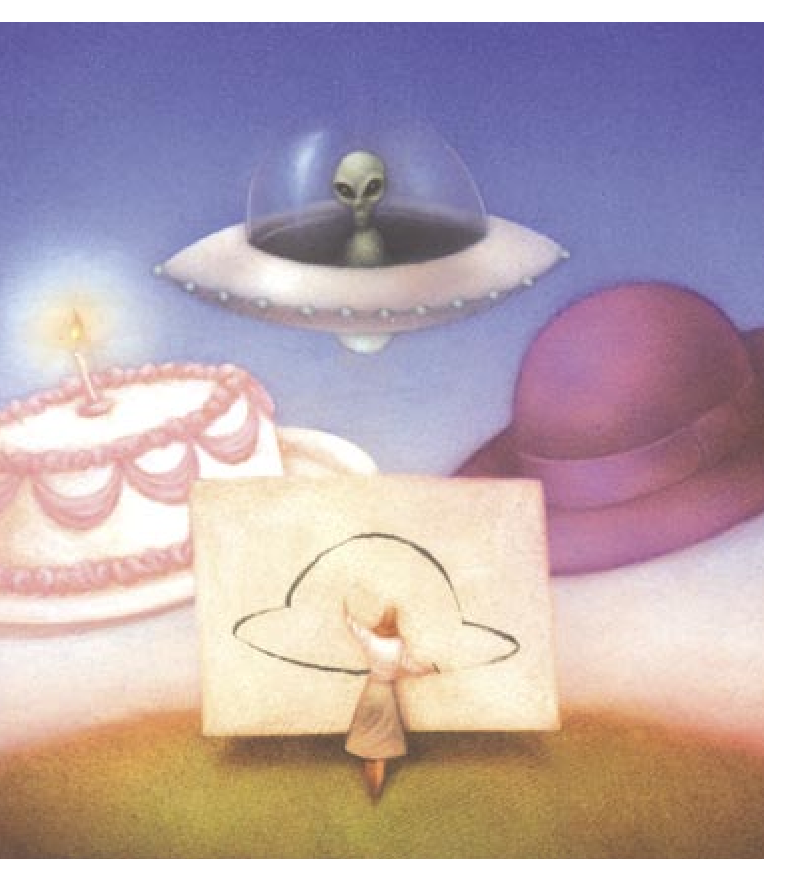
Por desgracia, el error al determinar la posición que cometen los sistemas basados en GPS (que es de tres o cuatro metros) todavía resulta bastante grande. Esa resolución se puede mejorar emplazando sensores en el interior de los edificios y mediante radiofaros en el exterior, pero resulta más bien caro. Además, la difusión de información no textual, sobre todo imágenes, audio o vídeo, exigiría anchuras de banda mayores que las disponibles en la actualidad para dispositivos de mano o redes inalámbricas. El protocolo IEEE 802.11b para redes inalámbricas de área local, que ofrece anchos de banda de hasta 11 megabits por segundo, se ha ensayado con éxito en dispositivos de búsqueda que tienen en cuenta la situación geográfica del usuario, pero todavía no está muy extendido.

Dibujos

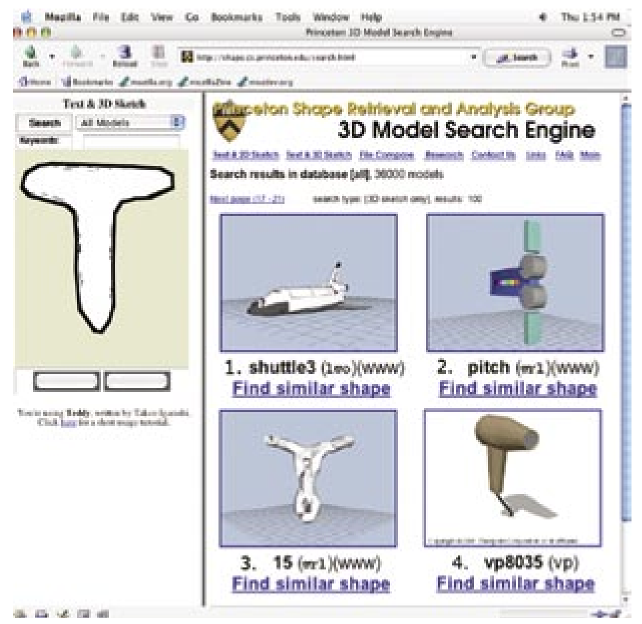
La palabra "contexto" puede referirse a algo más que los intereses personales o la ubicación del usuario. Los motores de búsqueda están yendo más allá de las peticiones escritas para buscar material gráfico. Son muchas las imágenes "tridimensionales" actualmente disponibles en la Red, pero a los artistas, ilustradores o diseñadores no siempre les resulta fácil encontrarlas mediante palabras clave. Un motor de búsqueda ideado por el Grupo de Análisis y Recuperación de Formas de Princeton aplica tres métodos para generar una petición de ese tipo (*véase la figura 4*). El primero utiliza Teddy, una herramienta para trazar esbozos con la que se dibujan figuras bidimensionales elementales. El programa genera una versión virtual "sólida" arrastrando por el espacio las figuras bidimensionales. Con el segundo, el usuario dibuja varias formas bidimensionales (que serían aproximaciones de diferentes proyecciones del objeto); seguidamente el motor de búsqueda compara los esbozos planos con 13 proyecciones precomputadas de cada uno de los objetos tridimensionales almacenados en su base de datos. En teoría, cabría generalizar esta función para que efectúe la recuperación a partir de cualquier conjunto de datos de imágenes planas. La tercera posible forma de encontrar una imagen consiste en cargar un archivo que contenga un modelo tridimensional.

Para casar las peticiones con las formas, el sistema, aún en desarrollo, empieza por describir cada forma mediante una serie de funciones matemáticas, a saber, funciones armónicas en el caso tridimensional y series trigonométricas en el de las representaciones bidimensionales. Seguidamente, produce a partir de cada función un juego de valores característicos de cada forma asociada. A esas "huellas dactilares" se las denominan signaturas, esféricas en el caso tridimensional y, circulares, en el

THOMAS FUNKHOUSER, GRUPO DE ANALISIS Y RECUPERACION DE FORMAS DE PRINCETON



4. EL BUSCADOR TRIDIMENSIONAL Search Engine, creado por el Grupo de Análisis y Recuperación de Formas de Princeton, compara la forma que se desea hallar con multitud de imágenes que presentan formas similares y se hallan disponibles en Internet. Diseñadores, ingenieros y arquitectos pueden así localizar con mayor rapidez objetos tridimensionales parecidos.



caso plano. Estos descriptores proporcionan dos ventajas: se los puede comparar independientemente de las orientaciones de los objetos original y buscado, y su cómputo y comparación se efectúan rápidamente.

¿Cómo se llama esa canción?

También la música está ya en la mira de los buscadores. Un problema clave que plantea el hallazgo de una determinada melodía consiste en determinar la mejor manera de formular la petición de búsqueda. Un posible tipo de solución consistiría en utilizar la notación musical o una forma de transcripción al pentagrama que permitiera al usuario especificar una melodía tecleando caracteres alfanuméricos que representasen notas musicales. Sin embargo, a la mayoría de los usuarios les resultaría difícil verter en notación musical la canción que tienen en mente.

El sistema Meldex, diseñado por el Proyecto de una Biblioteca Digital de Nueva Zelanda, resuelve el problema ofreciendo un par de métodos para encontrar música (*véase la figura 5*). El usuario puede consignar una petición tocando algunas notas en un teclado virtual del sistema o tarareando la tonada en el micrófono de un ordenador. Puede especificar parte de la letra mediante una petición escrita de búsqueda o combinar ésta con otra basada en la música.

Para que el sistema Meldex funcionase, los investigadores neozelandeses tuvieron que superar algunos obstáculos: el modo de dar a la petición musical una forma fácilmente computable; el almacenaje y examen digital de las partituras musicales, así como la comparación de las peticiones de búsqueda con los datos musicales almacenados. En el sistema, un proceso denominado cuantización traduce las peticiones a niveles de intensidad. Acto seguido, Meldex establece de forma automática las alturas musicales en función del tiempo analizando la estructura de la forma de onda generada en el primer paso y convierte el resultado en notas musicales. El sistema almacena tanto notas como obras completas en una base de datos de partituras musicales. Meldex, valiéndose de algoritmos de concordancia de cadenas simbólicas, encuentra peticiones musicales convertidas en notas que se corresponden con notas de la base de datos de partituras. Dado que las peticiones pueden contener errores, la función de concordancia de cadenas ha de tolerar cierta cantidad de "ruido".

Las búsquedas del futuro

Los servicios de búsqueda del futuro no se limitarán a las plataformas informáticas ordinarias. Algunos han sido integrados ya en ciertos sistemas portátiles de comunicación de datos (telemáticos) de uso en la automoción; es probable que se los incorpore también a los medios de búsqueda de equipos de entretenimiento, como las estaciones de juegos, en equipos estereofónicos o televisiones de altas prestaciones. Las técnicas de búsqueda desempeñarán, pues, papeles auxiliares invisibles, a menudo por intermedio de servicios "inteligentes" de la Red, en la conducción de vehículos, la audición de música o el diseño de productos.

Otro de los grandes cambios en la exploración de la Red girará en torno a convenios empresariales que ampliarán grandemente la cobertura en línea de la inmensa cantidad de materiales publicados —textos, vídeo, audio— que en la actualidad no son accesibles para los usuarios de ordenadores (*véase el recuadro* "Todos los medios en la Red").

Por ironía de las cosas, las técnicas de búsqueda de la próxima generación resultarán, a un tiempo, más y menos visibles al paso que realizan tareas de una complejidad y perfección cada vez mayores. La visibilidad estará representada por un instrumental más potente, que combinará las funciones de búsqueda con las de extracción de datos; se tratará de sistemas especializados que buscarán tendencias o anomalías en las bases de datos aun sin conocer su verdadero sig-

TODOS LOS MEDIOS EN LA RED

Aunque Internet abarca una enorme cantidad de información, gran parte de lo que hoy se publica —texto, audio o vídeo— no está disponible. Los contenidos son costosos y sus productores desean conservar el máximo control sobre lo que generan, por lo que restringen severamente el acceso. Esa situación, no obstante, está cambiando, conforme va creciendo la colaboración entre los productores de contenidos (como Time-Warner, Sony, Hearst o Elsevier) y los titulares de los buscadores "de marca" (en especial, los tres grandes, Yahoo, Google y MSN). El problema estriba en forjar acuerdos comerciales que resulten ventajosos para ambas partes.

Si llegaran a establecerse acuerdos contractuales entre los proveedores de contenidos mediáticos y los titulares de los buscadores, resultaría bastante sencillo que los programas de exploración (*crawlers*) rastreasen e indexaran los sitios de los proveedores.

En algunos proyectos piloto, los proveedores de contenidos están consintiendo la indexación de sus productos en bruto. Así, por ejemplo, Amazon ha puesto en marcha un proyecto experimental merced al cual sus clientes pueden leer los textos completos de los libros. Google ha introducido recientemente un servicio para editoriales y grandes bibliotecas, con el propósito de que ofrezcan sus libros para indexación.

Asistimos a movimientos similares en los apartados de audio y vídeo. Las grandes casas de discos y estudios de cine se muestran refractarios a ofrecer nuevas vías de distribución. No obstante, también aquí están surgiendo nuevas avenidas de distribución comercial. Apple ha promovido enérgicamente su tienda de música iTunes, y también Dell y Hewlett-Packard han anunciado servicios de distribución de música.

Según los observadores de la industria, lo más probable es que los buscadores acaben sirviendo de distribuidores o pasarelas para todo tipo de contenidos. Se encargarán de generar y mantener índices, así como de proporcionar servicios de búsqueda para diversas clases de medios publicados. Los proveedores de contenidos, entretanto, se concentrarán en sus actividades creativas.





5. ¿COMO SE LLAMA ESA CANCION? A quienes carecen de formación musical no les resulta fácil encontrar una canción o una determinada melodía en una base de datos musical de Internet. Gracias al sistema Meldex, perteneciente al Proyecto de una Biblioteca Digital de Nueva Zelanda, tarareando ante el micrófono de un ordenador una canción a medias recordada, o tecleando parte de la letra, queda rápidamente identificada la canción o la tonada concordante con esa información.

BIBLIOTECA DIGITAL DE NUEVA ZELANDA, UNIVERSIDAD DE WAIKATO

nificado. La invisibilidad corresponderá al desarrollo de miríadas de operaciones inteligentes de búsqueda para diversas aplicaciones y plataformas. Los progresos que se realicen tanto en la prospección de datos como en las interfases de usuario harán posible que un solo sistema proporcione automáticamente un continuo de refinados servicios de búsqueda, integrados sin fisuras en funciones visuales interactivas.

Gracias a los avances que se logren en las técnicas de clasificación y de aprendizaje de las máquinas, que comprenderán y categorizarán mejor el contenido de la Red, los programadores desarrollarán funciones visuales de extracción de datos, fáciles de usar, que aportarán una dimensión interactiva y visible a la función de búsqueda.

Los analistas de tendencias confían en que estará disponible una panoplia de posibilidades para la consecución de datos, sintonizadas cada una a la búsqueda de contenidos de un dominio o un formato específicos (por ejemplo, música o datos biológicos). Los programadores diseñarán estas funciones para que respondan rápidamente a las necesidades de los usuarios, a pesar de que manejarán grandes cantidades de información. Los buscadores de la Red indagarán en voluminosos depósitos de datos valiéndose de interfaces visualmente ricas que se centrarán en establecer amplios patrones en la información, en lugar de seleccionar registros individuales. En última instancia, a los usuarios de ordenadores les resultará difícil determinar dónde empieza la búsqueda y dónde la comprensión.

El autor

Javed Mostafa es profesor asociado en la Universidad de Indiana. Es también editor asociado de ACM Transactions on Information Systems y dirige el laboratorio de investigación en informática aplicada de Indiana. El autor dedica este artículo a una de sus maestras que más le estimularon, la señora Shaila, de la Escuela BWA de Chittagong, en Bangladesh.

Bibliografía complementaria

INFORMATION STORAGE AND RETRIEVAL. Ben Ami Lipetz en *Scientific American*, vol. 215, n.º 3, págs. 224-242; septiembre, 1966.

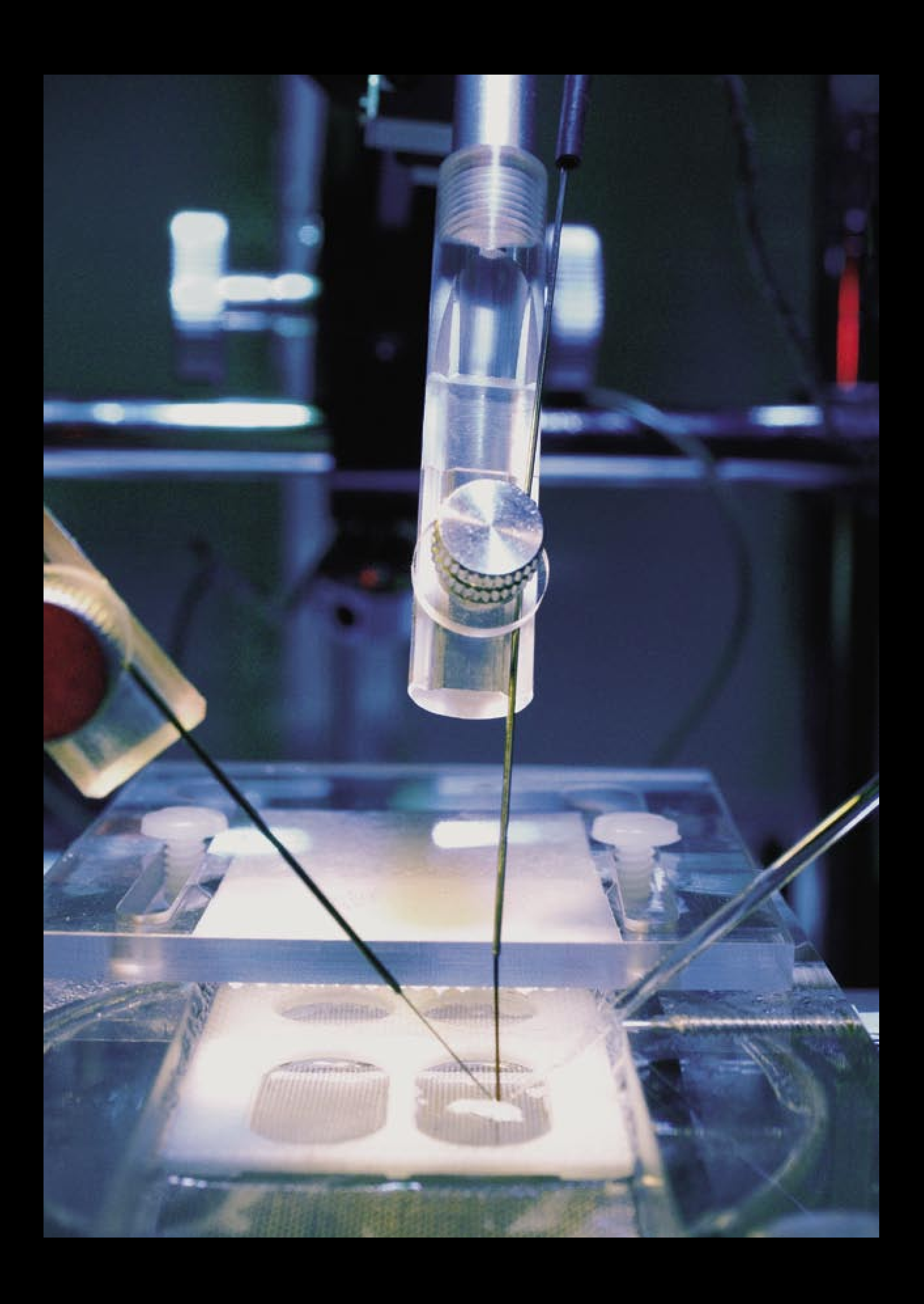
EXPLORING THE WEB WITH RECONNAISSANCE AGENTS. H. Lieberman, C. Fry y L. Weitzman en *Communications of the ACM*, vol. 44, n.º 8, págs. 69-75; agosto, 2001.

WEB SEARCH -- YOUR WAY. E. Glover et al. en *Communications of the ACM*, vol. 44, n.º 12, págs. 97-102; diciembre, 2001.

ROVER: SCALABLE LOCATION-AWARE COMPUTING. S. Banerjee et al. en *Computer*, vol. 35, n.º 10, páginas 46-53; octubre de 2002.

A SEARCH ENGINE FOR 3D MODELS. T. Funkhouser et al. en *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, n.º 1, págs. 83-105; enero, 2003.

SIMULATION STUDIES OF DIFFERENT DIMENSIONS OF USER'S INTERESTS AND THEIR IMPACT ON USER MODELLING AND INFORMATION FILTERING. Javed Mostafa, S. Mukhopadhyay y M. Palakal en *Information Retrieval*, vol. 6, n.º 2, págs. 199-223; abril, 2003.



Fijación de la memoria

Algunos momentos de la vida no se olvidan nunca, mientras que el recuerdo de otros se desvanece muy pronto. La razón podría esconderse en los mismos procesos que modelan los circuitos de un cerebro en desarrollo

R. Douglas Fields

En la película de suspense *Memento*, el protagonista, Leonard, recuerda cuanto le ocurrió antes de sufrir una lesión cerebral. No se acuerda en absoluto de lo que le ha sucedido desde entonces, de las personas con las que se ha encontrado. Ha perdido la capacidad de convertir la memoria a corto plazo en memoria a largo plazo. A los pocos minutos, lo recién sucedido desaparece de su mente, sin dejar rastro.

La historia inquietante narrada en la película se inspiró en el caso real de un paciente, un tal HM en la bibliografía clínica. Cuando HM tenía nueve años, sufrió un accidente con la bicicleta que le interesó la cabeza. Le dejó con un cuadro de epilepsia debilitante. Para aliviar sus ataques, que no podían controlarse por ninguna otra vía terapéutica, los cirujanos le eliminaron partes del hipocampo y regiones adyacentes. Se logró reducir la frecuencia de los episodios epilépticos. Sin embargo, en la intervención habían cortado, sin saberlo, la misteriosa conexión existente entre memoria a corto plazo y memoria a largo plazo. La información destinada a la memoria declarativa —relativa a personas, lugares y acontecimientos— debe llegar al hipocampo antes de quedar registrada en la corteza cerebral. Por eso, los recuerdos de hechos que se remontan a tiempos lejanos, almacenados ya en el cerebro de HM antes de la operación, se conservaron con nitidez; en cambio, sus experiencias del presente se desvanecían de inmediato en la nada. Visitaba a su médico todos los meses; cada vez, era como si se tratara de su primera entrevista.

Desde siempre los neurólogos se han sentido fascinados por la transformación de una experiencia mental presente en recuerdo perdurable. Cuando nos presentan a alguien, almacenamos su nombre en la memoria a corto plazo y puede perderse en pocos minutos. Pero hay ciertas informaciones —el nombre de nuestro mejor amigo— que se convierten en memoria a largo plazo y persisten toda la vida. El mecanismo por el cual el cerebro conserva ciertos momentos y permite que otros desaparezcan se ha ido aclarando recientemente. Para ello, hubo antes que resolver una paradoja fundamental.

La memoria, sea a largo o a corto plazo, nace de conexiones sinápticas entre neuronas. En las sinapsis, el axón, emisor de señales, establece contacto con las dendritas de la neurona adyacente, prolongaciones receptoras de señales. Cuando se crea una memoria a corto plazo, basta la excitación de la sinapsis para "reforzarla", o sensibilizarla transitoriamente, ante señales que puedan llegar más tarde. Para la memoria a largo plazo, ese reforzamiento de la sinapsis se convierte en algo permanente. Tal proceso requiere que se activen ciertos genes y se produzca la síntesis de las proteínas correspondientes.

Pero, ¿cómo pueden los genes, inmersos en el núcleo celular, regir lo que sucede en la lejanía de las sinapsis? ¿Cómo "sabe" un gen cuándo reforzar una sinapsis de forma permanente y cuándo dejar que un momento fugaz se desvanezca sin quedar registrado? ¿Y cómo "saben" las proteínas codificadas por el gen qué sinapsis, entre miles, deben reforzar? Las mismas preguntas sirven para comprender el desarrollo del cerebro fetal, esto es, cuando se deciden las conexiones sinápticas a mantener o, por

1. PARA SIMULAR LA FORMACION DE LA MEMORIA se emplea un aparato de registro electrofisiológico, que estimula la descarga de señales eléctricas en una sección, de 400 micrometros de espesor, de hipocampo de rata, para luego grabarlas.

KAY CHERNUSH

el contrario, descartar. Nos hallábamos en mi laboratorio estudiando esto último cuando dimos con una solución, muy prometedora, de uno de tales misterios de la memoria. La respuesta había estado siempre ante nosotros.

Memoria genética

Los biólogos moleculares descubrieron muy pronto que los genes desempeñan una función en la conversión de una memoria a corto plazo en memoria a largo plazo. Sus experimentos con animales adiestrados para realizar tareas elementales demostraron que el aprendizaje exigía la síntesis cerebral de nuevas proteínas a los pocos minutos de entrenamiento; de no ser así, el recuerdo de la tarea se perdía.

Para la síntesis de una proteína, un segmento de ADN debe, en el interior del núcleo, transcribirse en una molécula de ARN mensajero (ARNm); éste viaja del núcleo al citoplasma, donde la maquinaria celular traduce en una proteína las instrucciones que porta codificadas. Se había descubierto que, si se bloqueaba la transcripción del ADN en ARNm o se obstaculizaba la traducción del ARNm en una proteína, podía impedirse la formación de la memoria a largo plazo, sin que quedara alterada la memoria a corto plazo.

Puesto que una neurona puede establecer decenas de miles de conexiones sinápticas, y no cabe pensar en un gen dedicado a cada una de ellas, urgía encontrar una explicación del control nuclear sobre la intensidad de esas conexiones individuales. La sinapsis, se adujo, debía generar una molécula de señalización, hasta entonces desconocida, cuando recibía el estímulo adecuado. Con su conexión reforzada de un modo transitorio, la sinapsis en cuestión retendría el recuerdo durante un período corto de tiempo, mientras la molécula señalizadora partía de allí, camino del núcleo de la neurona. Alcanzado su destino, la molécula mensajera activaría los genes apropiados para la síntesis de proteínas encargadas de consolidar, de un modo permanente, la conexión sináptica.

Mas aparecía entonces un segundo problema: ¿cómo hallaba la proteína sintetizada en el soma celular la sinapsis que le corresponde entre las miles posibles?

A mediados de los años noventa, se contaba ya con una panorámica más detallada del proceso. Se había demostrado que cierto factor de transcripción, el CREB, desempeñaba una función clave en la conversión de la memoria a corto plazo en memoria a largo plazo en animales tan alejados desde el punto de vista filogenético como las moscas y los ratones. Los factores de transcripción son proteínas nucleares, que buscan y se enlazan con secuencias de ADN específicas. En última instancia, constituyen los interruptores definitivos y encargados del control de la transcripción de un gen. En concreto, la activación de CREB dentro de una neurona conducía a la activación de un gen; ésta, a su vez, instaba la síntesis de las misteriosas proteínas reforzadoras de las sinapsis; proteínas que transformaban la memoria a corto plazo en memoria a largo plazo.

En 1997 Uwe Frey, del germano Instituto Federal de Neurobiología, Regulación Génica y Plasticidad, y Richard G. M. Morris, de la Universidad de Edimburgo, dieron un gran paso. Mediante unos experimentos de una limpieza extraordinaria, demostraron que cualesquiera que fuesen estas “proteínas de memoria” no necesitaban estar dirigidas a una sinapsis en particular. Podrían distribuirse por la célula entera y condicionar sólo la sinapsis que estuviese ya transitoriamente reforzada; de ese modo, la conexión quedaría reforzada de forma permanente.

Tales descubrimientos dejaban abierta una cuestión candente: ¿cuál es la molécula de señalización que va de la sinapsis al núcleo, determina cuándo debería activarse CREB y conservarse un recuerdo? Por las mismas fechas abordábamos en mi laboratorio problemas idénticos, si bien desde una perspectiva diferente.

En mi laboratorio del Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano, estudiamos cómo se tienden las conexiones en el cerebro durante el desarrollo fetal. Los dedicados a la investigación de los procesos mnémicos se preguntaban por la repercusión génica de la experiencia mental, con su efecto subsiguiente en determinadas conexiones sinápticas. Nosotros estábamos interesados en conocer de qué modo los genes especificaban la formación de los millones de conexiones de un cerebro en desarrollo.

Corría ya la sospecha de que la experiencia mental tomaría parte en el tendido preciso de las conexiones cerebrales. El cerebro fetal podría comenzar su desarrollo con una red de conexiones muy simple, especificada mediante instrucciones genéticas. Luego, conforme el cerebro va progresando y contrastando tales conexiones, conservaría las más eficaces y eliminaría las que no interesasen. Pero, ¿cómo sabe el cerebro qué conexiones interesa mantener?

Un cerebro en construcción

Ya en 1949, Donald Hebb propuso que la experiencia refuerza determinados circuitos nerviosos conforme a una regla sencilla. Inspirado por los famosos experimentos de Pavlov con perros, Hebb supuso que se reforzarían aquellas conexiones entre neuronas que se excitaran a un mismo tiempo. Por ejemplo, una neurona que se excitara cuando sonaba una campana y una neurona próxima que activara cuando al mismo tiempo se ofreciese comida se conectarían con mayor fuerza entre sí; el circuito celular creado de esa forma aprendería que los dos sucesos van unidos.

No todos los estímulos que recibe una neurona llegan con la intensidad suficiente para que la célula elicite una

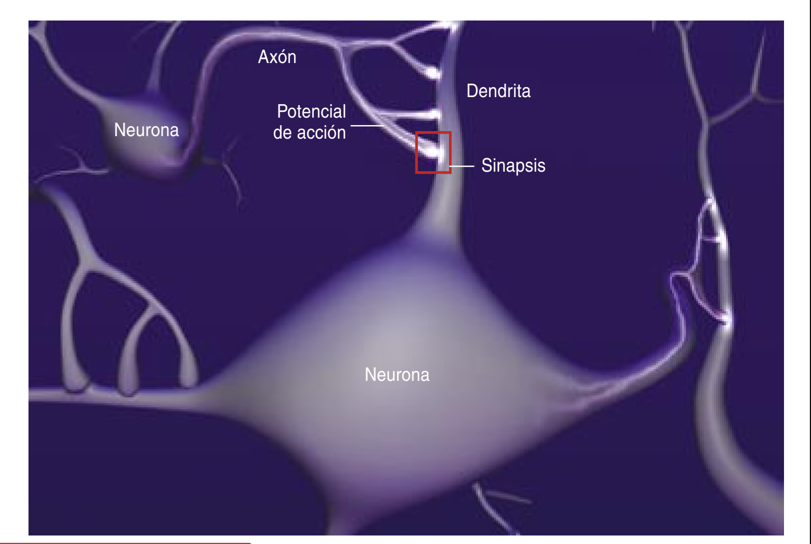
Resumen/*Neurología de la memoria*

- Toda neurona sabe qué recuerdos retener, a través de conexiones perdurables con otras neuronas, y cuáles permitir que se desvanezcan. Observamos un fenómeno similar en el cerebro en desarrollo: mantiene ciertos circuitos nerviosos y va podando otros.
- Ambos procesos se basan en señales electroquímicas que se originan en los confines de las prolongaciones de la neurona, activan genes del núcleo y obligan a éstos a reenviar la respuesta a la extremidad celular.
- La neurona sólo consolida una conexión si se ha demostrado su interés.

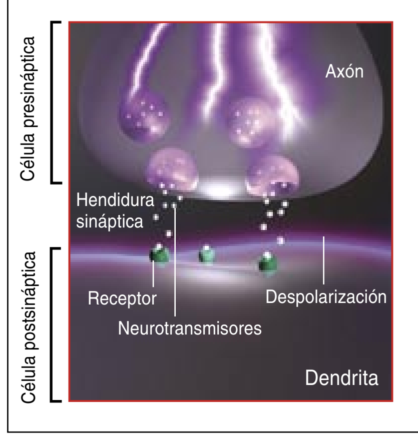
SINAPSIS Y MEMORIA

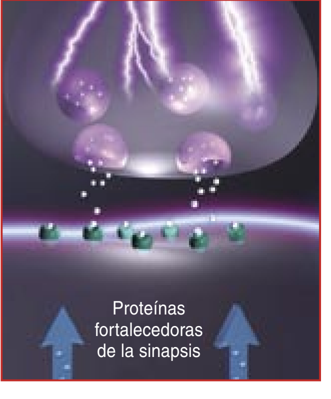
Los recuerdos se crean cuando las neuronas integradas en un circuito refuerzan la intensidad de las sinapsis. En la memoria a corto plazo, el efecto dura entre unos minutos y unas horas. Para la memoria a largo plazo, las sinapsis quedan consolidadas de un modo permanente.

La propia emisión de señales contribuye a la formación de la memoria. Empieza a transmitirse mensajes entre una neurona (presináptica) y otra (postsináptica) cuando un pulso eléctrico, o potencial de acción (*debajo*), viaja axón abajo hasta la punta.



SEÑALIZACION EN LA SINAPSIS. En el terminal axónico (*abajo*), el pulso provoca que las vesículas sinápticas de la neurona presináptica liberen neurotransmisores en la hendidura existente entre el axón y una dendrita de la neurona postsináptica. Los neurotransmisores se unen a receptores de la dendrita; de ese modo se despolariza la membrana de la célula postsináptica; se trata de la "descarga" de la sinapsis.





REFORZAMIENTO DE LA SINAPSIS. Tras una fugaz excitación a alta frecuencia, la sinapsis se torna más sensible; ante señales ulteriores, experimentará una oscilación mayor de potencial. En ese reforzamiento transitorio de la sinapsis descansa la memoria a corto plazo. Aunque el proceso no se conoce bien aún, sabemos que el reforzamiento permanente exigido en la memoria a largo plazo exige una condición: la síntesis de proteínas consolidantes de la sinapsis por parte de la célula postsináptica (*izquierda*). Estas proteínas podrían añadir más receptores, remodelar la parte postsináptica de la sinapsis e influir en las respuestas de la neurona presináptica.

ALFRED T. KAMAJIAN

respuesta genuina. A la manera de un microprocesador electrónico, la neurona recibe miles de señales por sus dendritas y de forma constante integra todos los impulsos que le llegan de tales conexiones. Mas, a diferencia de un microprocesador, que tiene muchas conexiones de salida, la neurona sólo dispone de una, el axón. Por ello, una neurona puede responder a los impulsos de una manera: o envía una señal a la neurona siguiente del circuito descargando un impulso a través de su axón, o no.

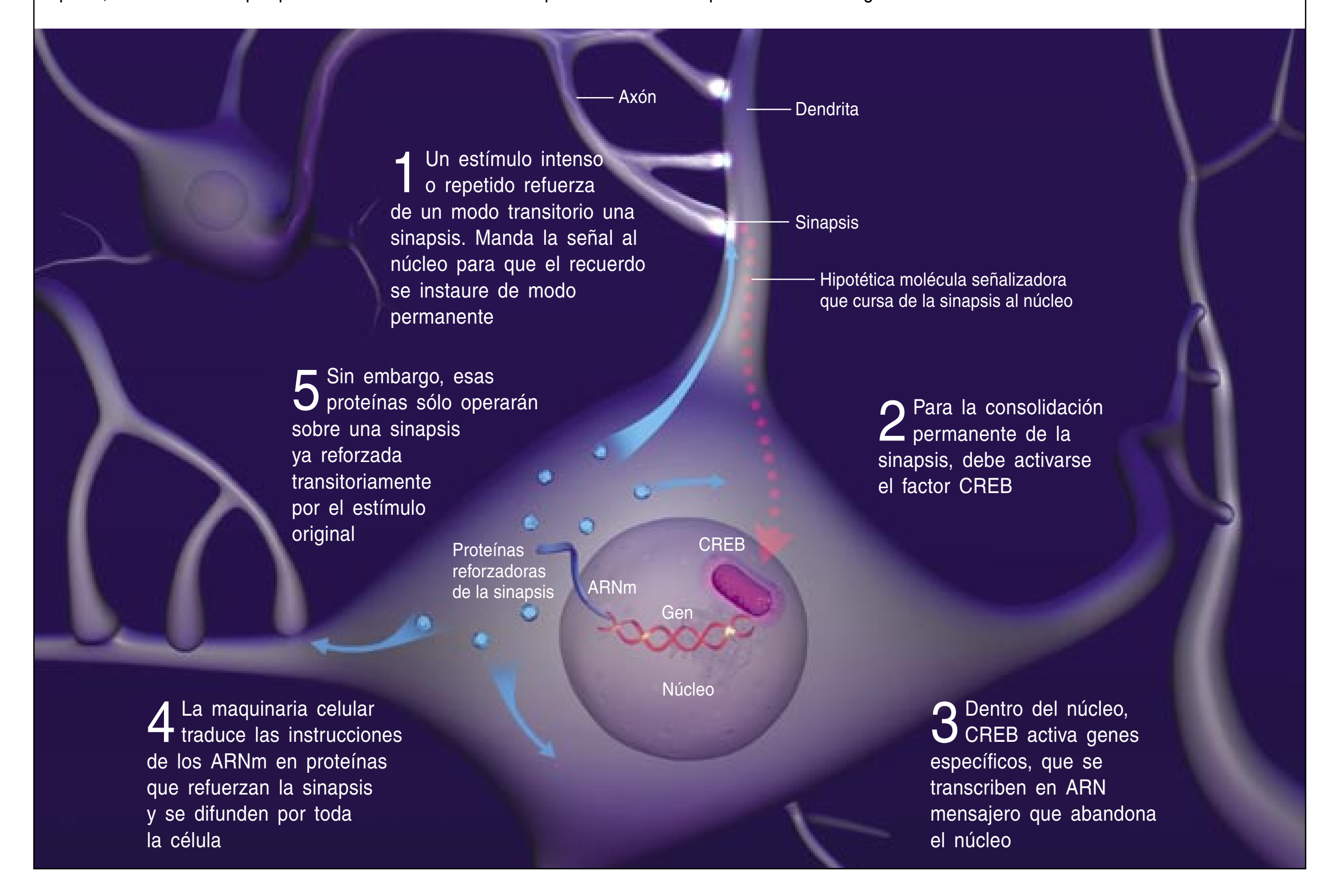
Cuando una neurona recibe tal señal, el potencial de membrana de su dendrita se vuelve algo más positivo. Si se produce ese cambio local de potencial, se dice que ha habido un "disparo" de la sinapsis de la neurona. Cuando una sinapsis dispara ráfagas breves de alta frecuencia, tiene lugar el reforzamiento transitorio que se observa en la formación de la memoria a corto plazo. No será, empero, suficiente la excitación fugaz de una sinapsis para que la neurona dispare por sí misma un impulso: un potencial de acción. Cuando muchas sinapsis de las neuronas se excitan a la vez, el esfuerzo combinado cambia el potencial de membrana en grado suficiente para que la neurona dispare potenciales de acción y transmita el mensaje a la neurona adyacente del circuito.

Hebb acudió a la metáfora del músico que se rezaga en una ejecución orquestal para describir el proceso: la sinapsis en contacto con una neurona que transmita en asincronía con los impulsos que recibe, se tomará por disonante y se eliminará, mientras que las sinapsis que transmiten al mismo tiempo —lo suficiente como para hacer que la neurona dispare un potencial de acción— se refuerzan. El cerebro iría tendiendo su propia red de conexiones de acuerdo con el flujo de impulsos que cursen por sus circuitos nerviosos en gestación, para de ese modo ir depurando la plantilla originaria.

Si de la teoría de Hebb pasamos al proceso físico real, volvemos a encontrarnos con que las enzimas y otras proteínas que refuerzan o debilitan las conexiones sinápticas mientras se van configurando los circuitos cerebrales deben sintetizarse a partir de genes específicos.

ASI FIJAN LOS GENES LA MEMORIA

En los años sesenta del siglo pasado se descubrió que la formación de la memoria a largo plazo requería la activación de genes, con la síntesis consiguiente de proteínas. Tal hallazgo suscitó nuevas cuestiones: ¿cómo "sabía" un gen, en su asentamiento nuclear, si debían sintetizarse las proteínas que refuerzan de modo perdurable una sinapsis, convirtiendo una memoria a corto plazo en otra a largo plazo, o si convenía que permaneciera silente a fin de que se desvaneciera la memoria a corto plazo? ¿Existe por descubrir una molécula señalizadora que curse la sinapsis hasta el núcleo y le muestre a la célula cuándo debe sintetizar reforzantes de la sinapsis? Y una vez fabricadas estas proteínas en el cuerpo celular, ¿cómo "saben" qué sinapsis reforzar entre las miles posibles? A mediados de los noventa, llegaron algunas respuestas merced a una serie de experimentos de elegante factura.



ALFRED T. KAMAJIAN

En consecuencia, nuestro grupo emprendió la búsqueda de las señales activadoras de dichos genes.

En el sistema nervioso, la información se presenta codificada en el patrón de actividad de los impulsos neurales del cerebro. Partí, pues, de la premisa de que determinados genes de las neuronas deben activarse y desactivarse de acuerdo con el patrón de disparo de impulsos. Para someter a prueba la hipótesis, extraje, con la ayuda de Kouichi Itoh, neuronas fetales de ratones y las hicimos crecer en cultivo. Podíamos estimularlas usando electrodos en la placa de cultivo. Promovimos la excitación de las neuronas obligándolas a transmitir potenciales de acción de acuerdo con diferentes patrones; medíamos luego la cantidad de ARNm producido por genes cuya importancia para la formación de circuitos nerviosos o la adaptación al medio nos era ya conocida. Conseguimos así pruebas de que nuestra predicción había sido acertada.

De hecho, podíamos activar y desactivar genes particulares; bastaba con seleccionar la frecuencia correcta de estímulo en nuestro estimulador electrofisiológico. Era como sintonizar una emisora de radio escogiendo la señal de frecuencia correcta.

Código de tiempo

Una vez observado que los genes de la neurona podían regularse en consonancia con el patrón de impulsos emitidos por la célula, abordamos una cuestión de mayor enjundia: ¿por qué podía el patrón de despolarización eléctrica en la superficie de la membrana celular controlar genes situados lejos de las prolongaciones, en el núcleo distante? Para averiguarlo, necesitábamos escudriñar el citoplasma y ver cómo se traducía la información en su camino desde la superficie al núcleo.

Lo que descubrimos no fue un camino real que condujera de la membrana plasmática al núcleo. Ante nuestros ojos apareció una red de reacciones químicas interconectadas. Había múltiples rutas bioquímicas entrecruzadas que conducían las señales a través de la célula desde la membrana celular. De uno u otro modo, las señales eléctricas, de frecuencias variables, de la membrana celular cursaban a través de este tráfico citoplasmático hasta

llegar a su destino específico en el núcleo. Deseábamos comprender cómo acontecía.

La información relativa al estado eléctrico de la membrana penetra en este sistema de reacciones químicas, sobre todo, mediante la regulación del flujo de entrada de iones calcio a través de canales de la membrana celular sensibles al potencial. Las neuronas viven en un mar virtual de iones calcio, pero en el interior de cada una la concentración de calcio se mantiene extremadamente baja, 20.000 veces menor que la concentración exterior. Cuando el potencial a través de membrana alcanza un nivel crítico, la célula dispara un potencial de acción y los canales de calcio se abren por un breve tiempo. La entrada de un chorro de iones calcio en el interior celular con el disparo de cada impulso nervioso tiene como consecuencia la traducción de un código eléctrico en un código químico, comprensible para la bioquímica del interior de la neurona.

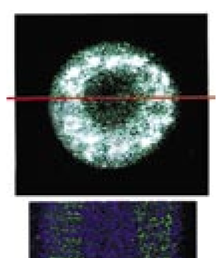
En cascada secuencial, los iones calcio entran en el citoplasma, activan enzimas proteínas quinasas, que, a su vez, activan otras enzimas por medio de una fosforilación. Esta última reacción química añade grupos fosfato a las proteínas.

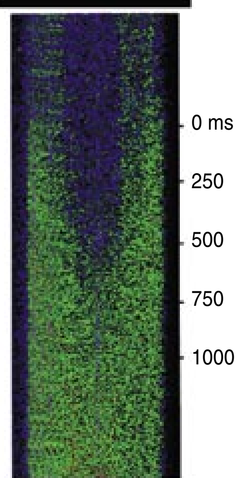
Las enzimas marcadas con fosfato, activadas, estimulan la función de los factores de transcripción; así, CREB se activa por medio de enzimas dependientes de calcio que lo fosforilan y se inactiva mediante enzimas que eliminan dicho fosfato. Ahora bien, en la célula encontramos cientos de factores de transcripción y proteínas quinasas diferentes. Nos interesa, pues, determinar el mecanismo en cuya virtud podía operar una frecuencia particular de disparo de potenciales de acción a través de los flujos de calcio hasta alcanzar la proteína quinasa apropiada y, en última instancia, los factores de transcripción correctos con el fin de controlar el gen indicado.

Mediante la incorporación en las neuronas de un colorante que muestra fluorescencia verde cuando se incrementa la concentración de calcio en el citoplasma, seguimos el curso de la traducción de diferentes patrones de descargas de potencial de acción en fluctuaciones dinámicas del calcio intracelular. La transcripción génica podría estar regulada —cabía suponer— por el incremento de la concentración de calcio en una neurona: según fuera el nivel de calcio, responderían unos genes u otros.

Sin embargo, apareció algo más interesante: el aumento de la concentración neuronal de calcio contaba mucho menos en la regulación de genes específicos que el patrón temporal de las ráfagas de calcio, reflejo del código correspondiente al impulso nervioso que había generado dichas ráfagas.

Feleke Eshete, otro becario posdoctoral de mi laboratorio, siguió la pista de estas señales de calcio hasta las enzimas que ellas activaban y los factores de transcripción que éstas regulaban. Empezábamos, por fin, a comprender el mecanismo de transmisión de distintos patrones de impulsos nerviosos a través de diferentes rutas de señalización intracelular. El quid de la cuestión estaba en el tiempo.





2. LOS IONES CALCIO brillan en este corte transversal de una neurona (*a la izquierda, con el núcleo oscuro en el centro*), relleno de un colorante sensible al calcio. El autor empleó un microscopio láser confocal de barrido para descubrir el camino recorrido por los pulsos de entrada de calcio que seguían a cada potencial de acción descargado por la célula. Series de imágenes de la figura superior tomadas a intervalos de dos milisegundos, y luego superpuestas (*abajo a la izquierda*), proporcionan una representación secuencial de la densidad intracelular de calcio (*verde y rojo*).

Descubrimos que no se debe representar la ruta desde la membrana celular hasta su ADN en una secuencia concatenada de reacciones químicas. En cada paso, desde que el calcio atraviesa la membrana, las reacciones se ramificaban en una red interconectada de rutas de señalización, cada una de las cuales tenía sus propios límites de velocidad que determinaban su capacidad de responder a señales intermitentes. Esta propiedad era la que establecía la ruta de señalización por la que accedía al núcleo una particular secuencia de potenciales de acción.

Algunas rutas de señalización respondían y se recuperaban con presteza. Podían, pues, reaccionar a patrones de potenciales de acción de alta frecuencia, si bien no se mantenían funcionales si se las sometía a descargas de potenciales de acción separadas por largos períodos de inactividad.

En cambio, otras rutas eran lentas. No respondían bien a las descargas rápidas de impulsos. Mas, una vez activadas, su propia lentitud ante la desactivación les posibilitaba mantener las señales entre descargas de potenciales de acción separadas por largos períodos de inactividad. Los genes que activa una ruta de este tipo reaccionan ante estímulos que llegan de forma repetida, aunque no frecuente; un proceso que evoca las repeticiones necesarias para afianzar en la memoria nueva información.

En otras palabras, observamos que las señales que presentan patrones temporales distintos se propagaban a través de rutas diferenciadas: la vía se hallaba en perfecta sintonía con el patrón correspondiente. Rutas que, en última instancia, regulan diferentes factores de transcripción y diferentes genes. Por botón de muestra: según nuestras mediciones CREB se activaba presto en respuesta a potenciales de acción, pero tardaba en desactivarse, una vez que dejábamos de estimular a la neurona. De ese modo, CREB podía mantener su activación entre descargas repetidas de estímulos separadas por intervalos de 30 minutos o más, similares a los intervalos de tiempo entre sesiones prácticas requeridos para adquirir destrezas o fijar datos.

Teniendo en cuenta el papel de CREB en la memoria, no podíamos omitir la pregunta obvia: ¿intervenía también en los mecanismos mnémicos la ruta de señalización que estábamos investigando para desentrañar el desarrollo de las conexiones cerebrales? Valía la pena averiguarlo.

Cultivando la memoria

Si el hipocampo seccionado del paciente HM se le elimina a una rata y se mantiene en una solución salina, podemos registrar, mediante microelectrodos y amplificadores electrónicos, los impulsos eléctricos de conexiones sinápticas individuales que llegan a una neurona. Si administramos una ráfaga de shocks eléctricos a una sinapsis, de suerte que las descargas de ésta se atengan a un patrón específico, se reforzará la conexión sináptica. Es decir, en cuanto ha recibido el estímulo de alta frecuencia, la sinapsis emitirá el doble de potencial en respuesta ante ulteriores estímulos.

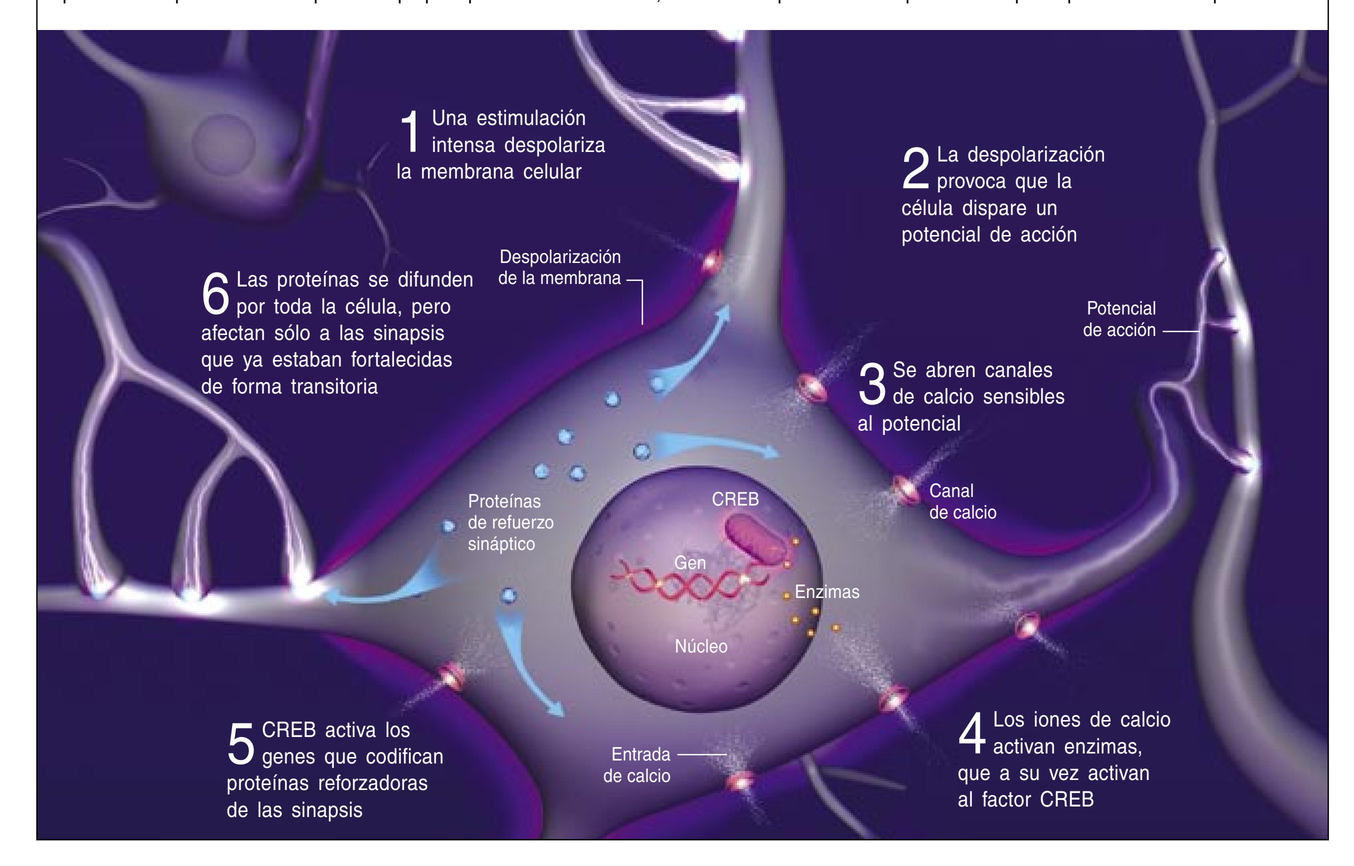
Esta potencia incrementada, llamada potenciación a largo plazo (PLP), quizá dure poco, no obstante su denominación. Cuando se aplican pulsos de prueba tras el estímulo de alta frecuencia, espaciados por una serie de intervalos, el potencial producido por la sinapsis decae con lentitud hasta volver a su potencia original al cabo de unas horas. Este reforzamiento sináptico, conocido como PLP precoz, constituye un modelo celular de la memoria a corto plazo.

Si el mismo estímulo de alta frecuencia se aplica repetidamente (en nuestros experimentos, tres veces), la sinapsis se consolida de forma permanente, un estado llamado PLP tardía. Sin embargo, el estímulo no debe repetirse una vez detrás de otra. Entre ráfaga y ráfaga debe mediar un intervalo suficiente de inactividad (en nuestros experimentos, 10 minutos). Asimismo, añadiendo a la solución salina que baña el corte de cerebro compuestos que bloquean la síntesis de ARNm o de proteína, se provoca que la sinapsis se debilite hasta su potencial original en unas dos o tres horas. Tal y como ocurre en los organismos enteros, el modelo celular de la memoria a corto plazo no depende del núcleo; sí, en cambio, la memoria a largo plazo.

Frey y Morris se habían servido de esa técnica para poner de manifiesto que las proteínas reforzadoras de las sinapsis operaban sobre cualquier sinapsis que contase ya con un refuerzo temporal. Primero, estimularon brevemente una sinapsis para inducir una PLP precoz, que, en condiciones normales, duraría unas horas. Activaban, luego, una segunda sinapsis de la misma neurona que indujese una PLP tardía en esa sinapsis: tres ráfagas separadas por intervalos de 10 minutos. Como resultado, ambas sinapsis quedaban reforzadas de modo permanente. El estímulo más intenso mandaba al núcleo una señal

GENES Y SINAPSIS

Los experimentos llevados a cabo en el laboratorio del autor demuestran que no es necesario el recurso a una hipotética molécula de señalización que parta de la sinapsis y curse hasta el núcleo. Una estimulación intensa, causada por la descarga repetida de una sola sinapsis o provocada por la descarga simultánea de varias sinapsis de una misma neurona, despolariza la membrana celular, provocando que la célula dispare sus propios potenciales de acción; éstos, a su vez, promueven la apertura de canales de calcio sensibles al potencial. Los iones de calcio interaccionan con enzimas que activan el factor de transcripción CREB, que, por su parte, insta a los genes para que se fabriquen proteínas reforzadoras de la sinapsis. El núcleo "toma nota" de la respuesta de la célula —expresada mediante el disparo de potenciales de acción— a la hora de reforzar una sinapsis de forma permanente para que un recuerdo perdure.



ALFRED T. KAMAJIAN

que instaba la síntesis de proteínas de memoria. Las proteínas "localizaban" cualquier sinapsis ya preparada para usarlas.

Nos preguntamos si de verdad se requería el envío de una molécula señalizadora, de la sinapsis al núcleo, para incoar la formación de la memoria a largo plazo. Partíamos de nuestros propios hallazgos, relativos a la activación de genes específicos por diferentes patrones de impulsos. Y nos apoyábamos también en la tesis de Hebb según la cual resulta imprescindible la *excitación* de una neurona para determinar la conexión concreta a reforzar.

Ante ese cuadro, nosotros propusimos que, cuando la fuerza de la descarga de una sinapsis, o su sincronización contra sinapsis, provocaba que la neurona disparase potenciales de acción por su axón, el calcio entraba directamente en la célula a través de canales sensibles al potencial existente en el soma; ponía también en funcionamiento las rutas, estudiadas ya, que abocaban en la activación nuclear de CREB.

Para someter a prueba nuestra teoría, Serena Dudek y yo mismo administramos a la sección de cerebro una droga bloqueante de la función sináptica. Aplicamos luego un electrodo para estimular directamente axón y soma celular, con la consiguiente descarga neuronal de potenciales de acción. De este modo, las neuronas disparaban potenciales de acción, pero las conexiones sinápticas de entrada no alcanzaban a hacerlo. Si se necesitaba una molécula de la ruta de señalización de la sinapsis al núcleo para desencadenar una PLP tardía —nuestro modelo celular de la formación de memoria a largo plazo—, ese procedimiento no funcionaría, porque las sinapsis habían sido silenciadas por la droga. Ahora bien, si las señales dirigidas al núcleo se originaban en las neuronas que disparaban potenciales de acción —según ocurría en nuestros estudios de desarrollo—, entonces el silenciar las sinapsis no impediría la activación nuclear de los genes de las proteínas de memoria.

Analizamos el tejido cerebral. Queríamos saber si se había activado el factor de transcripción CREB. En la zona de la sección de cerebro que había sido estimulada para disparar potenciales de acción en ausencia total de actividad sináptica, todas las moléculas CREB portaban agregado un grupo fosfato: habían pasado a su estado funcional.

Comprobamos luego la actividad del gen *zif268*, asociado a la creación de PLP y memoria. También aparecía activado por la descarga neuronal del hipocampo, sin ninguna estimulación sináptica. Pero si llevábamos a cabo la misma estimulación en presencia de otra droga que bloquea los canales de calcio sensibles al potencial —sobre los cuales recaía nuestra sospecha de que constituyeran el verdadero origen de la señal que va de la membrana al núcleo—, no se activaban, excitadas las neuronas, ni la fosforilación de CREB, ni *zif268* ni MAPK, una proteína asociada con la PLP tardía.

Estos resultados mostraban sin ambages que no se necesitaba el trasiego de un mensajero desde la sinapsis hasta el núcleo. Al igual que en nuestros estudios del desarrollo, la despolarización de la membrana por los potenciales de acción abría canales de calcio en la membrana de la neurona, activaba así rutas de señalización hacia el núcleo y promovía la expresión de los genes apropiados. Tiene sentido que la memoria funcione de este modo. No debe mandar cada sinapsis que se encuentra en contacto con la neurona mensajes privados al núcleo; antes bien, la maquinaria transcripcional del núcleo presta atención a la señal de la neurona para decidir si sintetizar o no las proteínas que fijan la memoria.

Memento molecular

Habrá, sin duda, por descubrir moléculas de señalización desde la sinapsis hasta al núcleo. Moléculas que participen en el proceso de la memoria. Con todo, nuestros experimentos indican que no son imprescindibles. Tal y como predicen las reglas del aprendizaje de Hebb, el fenómeno necesario para la consolidación de los recuerdos lo constituye la descarga de una neurona, resultado de la excitación combinada de sus receptores sinápticos.

Las células remedan nuestras experiencias mnémicas de la vida diaria. Igual que el protagonista de *Memento* o cualquier testigo de un crimen, no siempre sabe de antemano qué hechos se convertirían en recuerdos permanentes. De los recuerdos momentáneos que precisamos para desenvolvernos en el presente se encargan los ajustes pasajeros en la fuerza de sinapsis individuales. Pero cuando un acontecimiento adquiere suma importancia o se repite lo suficiente, las sinapsis descargan para hacer que, a su vez, la neurona dispare impulsos nerviosos de manera repetida y potente; como si dijera: "éste hecho debe grabarse". Los genes pertinentes se expresan; se consolidan las sinapsis responsables de la memoria a corto plazo merced a la presencia de proteínas reforzadoras.

El autor

R. Douglas Fields es jefe de la Sección del Desarrollo del Sistema Nervioso y Plasticidad del Instituto Nacional norteamericano de Salud Infantil y Desarrollo Humano. Comparte esa labor con la docencia en la Universidad de Maryland.

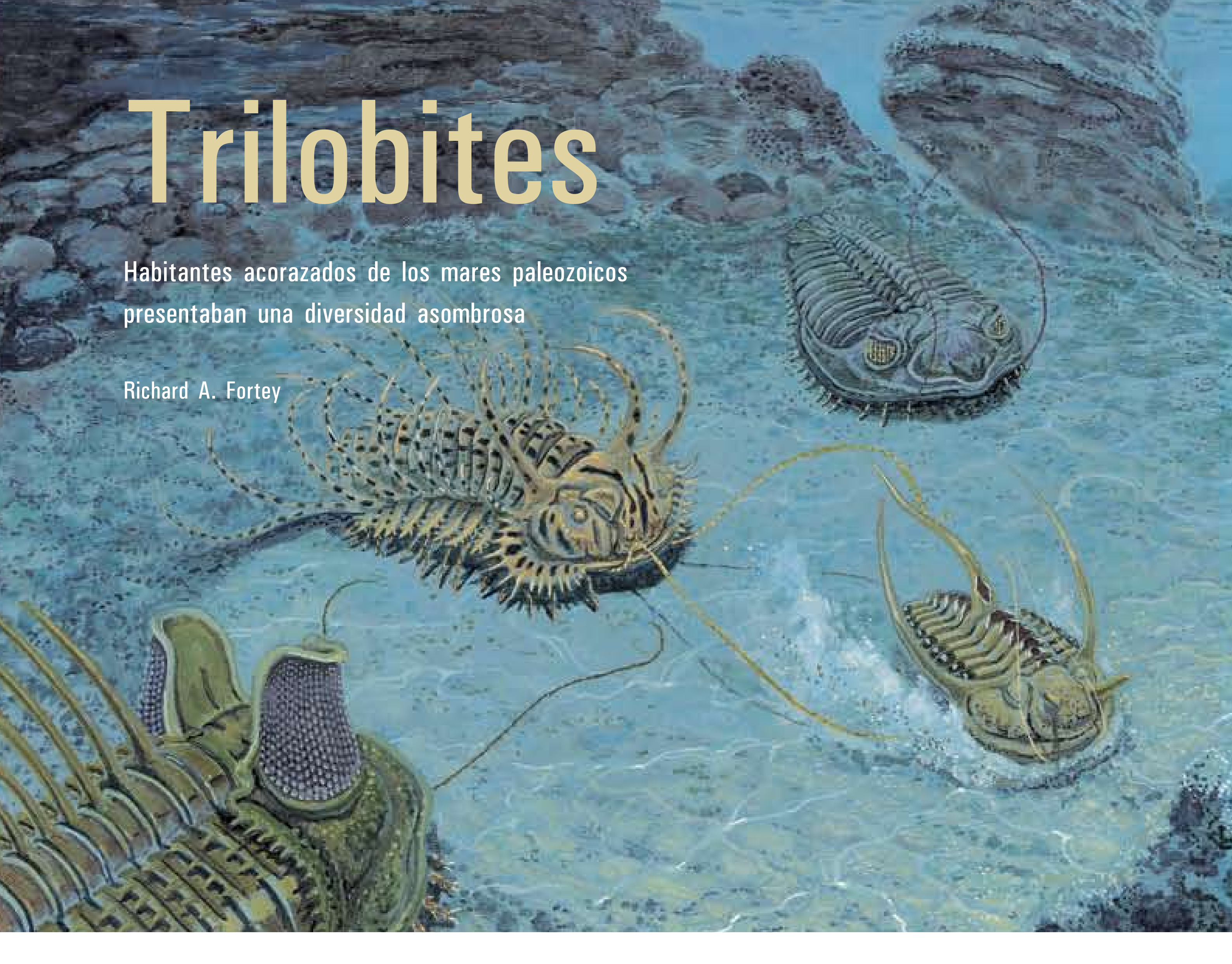
Bibliografía complementaria

REGULATED EXPRESSION OF THE NEURAL CELL ADHESION MOLECULE L1 BY SPECIFIC PATTERNS OF NEURAL IMPULSES. Kouichi Itoh, B. Stevens, M. Schacner y R. D. Fields en *Science*, vol. 270, págs. 1369–1372; 24 de noviembre, 1995.

SYNAPTIC TAGGING AND LONG-TERM POTENTIATION. Uwe Frey y Richard G. M. Morris en *Nature*, vol. 385, n.º 6616, págs. 533–536; 6 de febrero, 1997.

SOMATIC ACTION POTENTIALS ARE SUFFICIENT FOR LATE-PHASE PLP-RELATED CELL SIGNALING. Serena M. Dudek y R. Douglas Fields en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 99, n.º 6, págs. 3962–3967; 19 de Marzo, 2002.

MEMORY SYSTEMS OF THE BRAIN: A BRIEF HISTORY AND CURRENT PERSPECTIVE. Larry R. Squire en *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 82, págs. 171-177; noviembre, 2004.



Trilobites

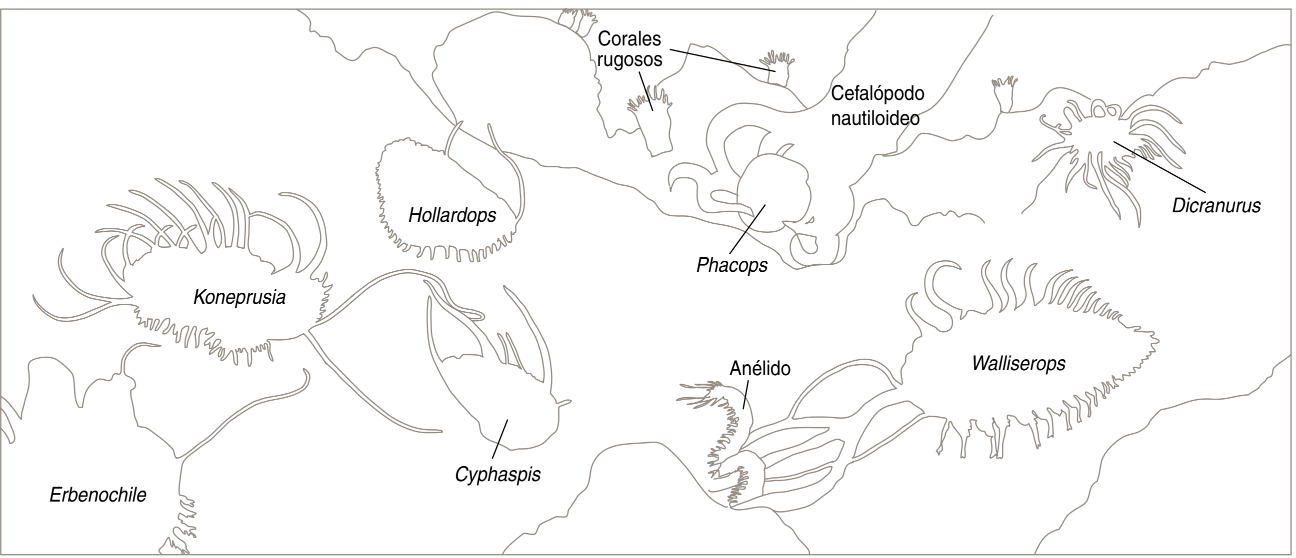
Habitantes acorazados de los mares paleozoicos presentaban una diversidad asombrosa

Richard A. Fortey

Si pudiéramos sumergirnos bajo los mares del Ordovícico, hace unos 450 millones de años, aparecería ante nuestros ojos un asombroso paisaje plagado de trilobites. Algunos eran grandes como platos; otros, del tamaño de un camarón moderno; los había también menores que un guisante. Medraban en casi todos los ambientes, desde las aguas someras hasta las más profundas e incluso afóticas. Había trilobites cubiertos de espinas, como acericos; otros, totalmente lisos, parecían cochinillas gigantes. Algunos contaban con extrañas prolongaciones delanteras, sin parangón en los animales actuales. No sólo los había dotados de grandes ojos; tampoco faltaban los ciegos.

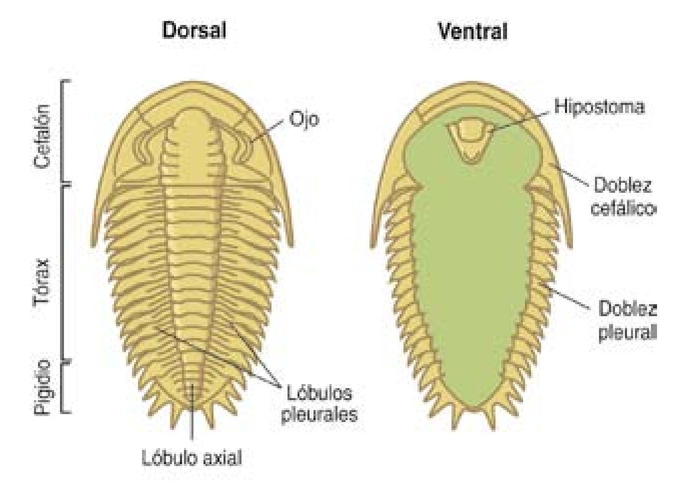
Tan asombrosa variedad de formas reclama diferentes nichos ecológicos. Contamos con un buen registro fósil, puesto que fueron los primeros artrópodos en secretar un exoesqueleto de calcita. Pero la mineralización no afectaba a todo el exoesqueleto: a diferencia de los cangrejos y langostas actuales, los apéndices de los trilobites nunca contaron con un recubrimiento calcáreo, por lo que fosilizaron sólo en raras ocasiones. El caparazón dorsal, en cambio, sí formaba un escudo protector; se plegaba ventralmente alrededor de todo el cuerpo del animal para formar el *doblez*. Los tres lóbulos a los que alude el vocablo "trilobites" comprenden un raquis diferenciado (en general convexo), flanqueado por dos áreas pleurales, dobladas lateralmente. Transversalmente, estos animales se dividen también en tres partes: una cabeza (*cefalón*), en la que se encuentran los ojos, un tórax flexible, compuesto por un número variable de segmentos articulados, y una cola (*pigidio*), que consta de varios segmentos fusionados. A partir de este esquema básico, los trilobites presentaban un sinfín de variaciones.

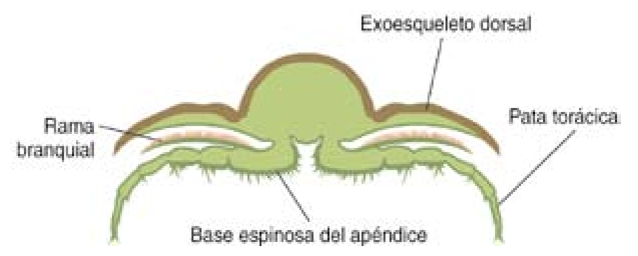
Si algunos apéndices de trilobites se han conservado en estado fósil es porque, antes de pudrirse, se impregnaron de un mineral (pirita o apatito), que persistió después de que las bacterias descompusieran los tejidos blandos. Lo mismo que insectos y crustáceos, sus parientes artrópodos, los trilobites estaban dotados de antenas en la parte frontal de la cabeza. Por detrás de éstas, numerosos apéndices se disponían en pares —uno para cada segmento torácico— a lo largo de todo el cuerpo. Cada apéndice constaba de una rama interna locomotora y una rama externa respiratoria dotada de filamentos branquiales. A este patrón básico responden todos los apéndices de trilobites hallados fósiles; ello sugiere que gran parte de las variaciones en el diseño de los trilobites afectaban sólo al exoesqueleto





1. EL ANTIGUO FONDO MARINO de lo que hoy es Marruecos constituyó en el Devónico, hace más de 350 millones de años, un extraño parque zoológico de trilobites. Durante sus 270 millones de años de reinado en los mares, los trilobites habitaron una amplia variedad de nichos; los hubo predadores, carroñeros, filtradores y sedimentívoros. Algunos corrían por el fondo del mar o nadaban mediante cortos impulsos, mientras que otros "navegaban" a diferentes profundidades en la columna de agua. Los últimos trilobites desaparecieron inmediatamente antes de la Gran Extinción Pérmica, ocurrida hace unos 250 millones de años.





2. LA ANATOMIA de un trilobites atestigua su parentesco artropodiano con las arañas, los escorpiones y los cangrejos bayoneta (o herradura). El caparazón dorsal protegía las partes blandas y también los delicados filamentos branquiales que se situaban por encima de cada rama locomotora de los apéndices (*abajo*). La figura muestra un trilobites típico.



3. VISTA VENTRAL del trilobites devónico *Phacops*. Se aprecian varios pares de apéndices, con las correspondientes ramas locomotoras y branquiales. Los apéndices de los trilobites se conservan muy raramente, puesto que no estaban protegidos por un exoesqueleto mineralizado. Este fósil procede de la cantera de pizarras de Hunsrück.

calcificado. Un amplio registro fósil muestra la diversidad de formas que adoptaron estos habitantes acorazados del Paleozoico.

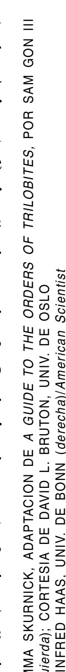
Los trilobites aparecen en el registro fósil de forma brusca en estratos del Cámbrico inferior, hace alrededor de 522 millones de años. En un corto plazo de pocos millones de años presentan ya una asombrosa abundancia y diversidad. Hasta la fecha, se han descrito más de 5000 géneros; sin duda se descubrirán muchos más. El grupo entero desapareció unos 270 millones de años después, cerca del final del Pérmico, durante la "gran extinción" que exterminó el 95 por ciento de las especies acuáticas. De no haber estado cabalmente adaptados para la vida en los mares paleozoicos, los trilobites no hubieran sobrevivido y proliferado durante tan largo tiempo. ¿En qué consistían dichas adaptaciones?

Reconstruir la vida de unos organismos que se extinguieron hace cientos de millones de años entraña mayor dificultad; además, nunca podremos estar totalmente seguros de nuestras deducciones. Sin embargo, no se trata de una misión imposible. La ciencia nos ofrece varias formas de proceder. Podríamos, por ejemplo, examinar la fauna actual en busca de artrópodos con estructuras similares a las de algún trilobites en particular; la semejanza indicaría que ambos compartían formas de vida. Podríamos también estudiar la estructura del trilobites como si de un producto de la ingeniería biológica se tratara, para deducir qué podía y qué no podía hacer el animal. Otra opción consistiría en estudiar los estratos geológicos que albergan los fósiles, pues suelen encerrar información de valor sobre el hábitat que ocuparon estos animales. ¿Vivían en aguas profundas? ¿Se habían adaptado a la vida de arrecifes? En afortunadas ocasiones, los diferentes hallazgos apuntan hacia una misma conclusión, que permite arrojar un adarme de luz sobre la vida de estos organismos.

Ojos multilenticulares

Los ojos entrañan numerosas pistas acerca de la forma de vida de un animal. Sin embargo, al estar formados por tejido blando, raramente fosilizan. Salvo en los trilobites. Si bien compartían rasgos con los ojos compuestos (multilenticulares) de los artrópodos modernos, los ojos de los trilobites se distinguían por su lente de calcita. Este mineral ofrecía ventajas ópticas para el sistema visual del animal: la luz pasa por uno de sus ejes cristalográficos sin sufrir refracción. Dado que el eje óptico se encontraba perpendicular a la superficie de cada lente, puede deducirse la dirección en la que miraban las lentes del trilobites.

En su mayoría, los trilobites estaban dotados de ojos *holocroales*: ojos que constaban de un gran número —incluso millares— de pequeñas lentes hexagonales capaces de detectar pequeños movimientos a su alrededor. Estas solían mirar lateralmente, es decir, enfocando la superficie del sedimento sobre la que medraban los organismos bentónicos. Otros contaban con ojos *esquizocroales*, con menor número de lentes aunque de mayor tamaño, biconvexas y separadas entre sí por placas. Se trataba de

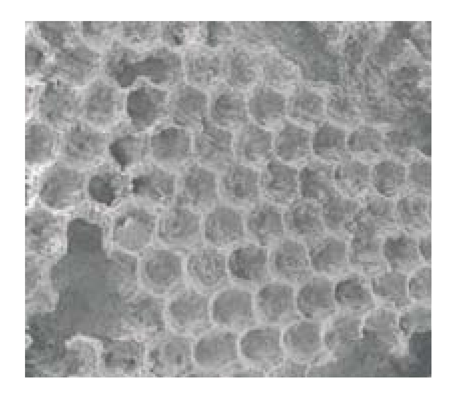


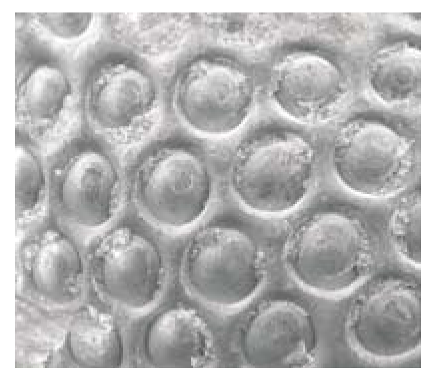
lentes muy refinadas; contaban con variaciones internas del índice de refracción para corregir la aberración esférica y otros problemas ópticos. El campo visual de los ojos *esquizocroales* solía ser también lateral. En algunas especies, los ojos adoptaban forma de torre; puesto que los ejes ópticos eran paralelos entre sí, alcanzaban a ver a largas distancias. Un trilobites descrito recientemente mostraba incluso una suerte de visera que lo protegía de los rayos luminosos que, por incidir desde arriba, interferían en su visión.

Pero hubo también trilobites que perdieron los ojos, fenómeno que se repitió varias veces en el curso de la historia del grupo. Los fósiles de trilobites ciegos se encuentran asociados a medios profundos, por debajo de la zona fótica (al alcance de la luz solar), en donde los ojos no serían necesarios. Estos habitantes de aguas profundas perdieron la visión de forma progresiva, mediante la reducción en el número de lentes hasta la total desaparición de la superficie visual. No se conocen casos de recuperación de los ojos una vez perdidos.

En el extremo opuesto se encontraban los trilobites dotados de ojos hipertrofiados. Algunos mostraban unos grandes ojos globulares, con lentes dispuestas por toda la superficie; el campo visual de estas especies era mayor que el del resto de los trilobites, pues las lentes estaban dirigidas hacia arriba, hacia abajo e incluso hacia atrás, proporcionando una visión de casi 360 grados.

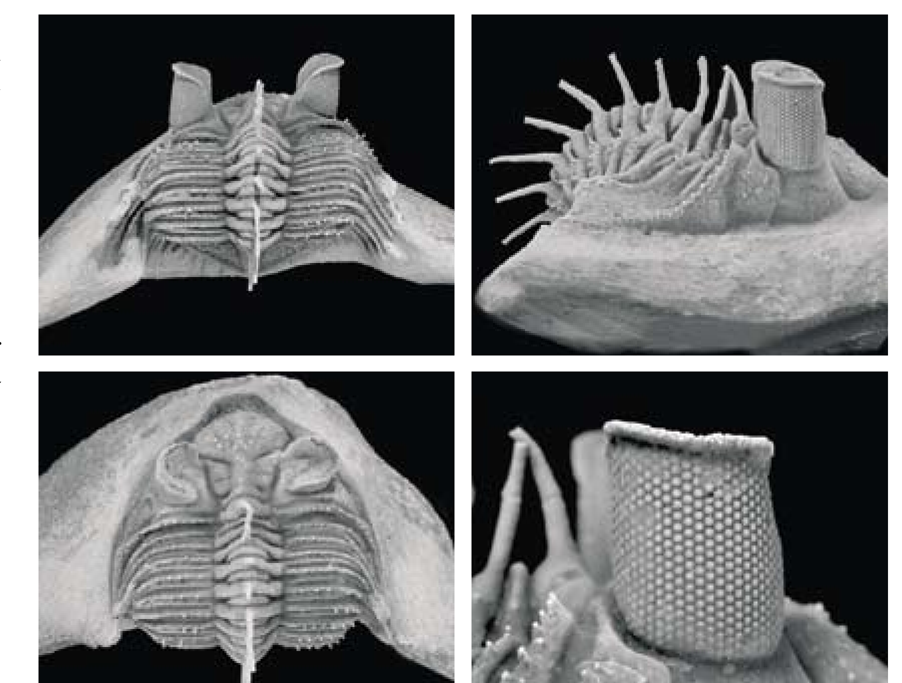
En 1975 describí una versión extrema de estos animales, el *Opipeuter* ("el que mira fijamente"), descubierta en rocas ordovícicas de Spitsbergen. Estos trilobites mostraban otras peculiaridades: un cuerpo más bien pequeño y alargado, y unas pleuras laterales del tórax reducidas, a pesar de que parecen haber gozado de una potente musculatura. Algunas especies contaban con espinas dirigidas hacia abajo en los márgenes de la cabeza. Puesto que ello apenas suponía una adaptación a la vida bentónica, parece lógico pensar que se trataba de trilobites pelágicos que nadaban activamente en el mar abierto. Para economizar el peso del exoesqueleto, se truncaron las áreas laterales; en la cabeza, en cambio, el lateral solía estar ocupado por unos ojos enormes. Existen en la actualidad crustáceos anfípodos con hábitos similares, dotados también de ojos hipertrofiados.



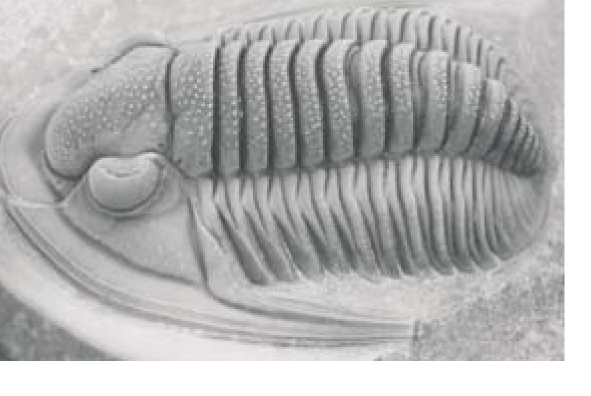


4. LOS OJOS COMPUESTOS de los trilobites solían ser holocroales (*izquierda*) o esquizocroales (*derecha*). Los holocroales estaban formados por lentes hexagonales densamente dispuestas (hasta 15.000 por ojo). Los esquizocroales contenían menor número de lentes pero de mayor tamaño y separadas por placas exoesqueléticas.

Los trilobites pelágicos abundaron sobre todo durante el período Ordovícico, cuando quizás ocuparon los mismos nichos en que hoy habita el krill. Algunos de ellos presentaban una amplia distribución geográfica, harto mayor que la de sus contemporáneos bentónicos. En fecha reciente, Tim McCormick y yo analizamos la morfología de una de estas especies ordovícicas, *Carolinites genacinaca*, en muestras procedentes de distintas partes del planeta. Hallamos que la misma especie habitaba en los actuales EE.UU., Artico, Siberia, Australia y China —es decir, toda el área ecuatorial de entonces—, distribución que guarda semejanza con la de algunos animales planctónicos modernos.



5. *ERBENOCHILE ERBENI*, un trilobites del Devónico de Marruecos, estaba dotado de unos ojos esquizocroales espectaculares, que se elevaban por encima de su cabeza en poderosas columnas. Su campo visual abarcaba cerca de 360 grados; así lo muestran estas imágenes vistas desde la parte posterior (*arriba a la izquierda*), lateral (*arriba a la derecha*) y desde arriba (*abajo a la izquierda*). El detalle del ojo compuesto (*abajo a la derecha*) muestra la visera que les protegía de la luz directa.



6. *CORNUPROETUS* estaba dotado de ojos holocroales, que le permitían escudriñar el fondo del mar lateralmente. Esta debió ser la visión típica de los trilobites bentónicos.

En *Carolinites genacinaca*, pues, la morfología funcional, la distribución geológica y la comparación con la fauna actual apuntan hacia una forma de vida pelágica.

Algunos trilobites de ojos hipertrofiados debieron vivir, sin embargo, a mayores profundidades. Los ciclopígidos, de ojos saltones, medraban en aguas profundas, probablemente por debajo de los 200 metros. A menudo se les encuentra junto a trilobites ciegos que habitaban el fondo marino, en sedimentos que se acumularon en los márgenes de antiguos continentes o en zonas de plataforma profunda. Los ojos de estos trilobites son análogos a los de los insectos y crustáceos actuales que viven en zonas poco iluminadas. Ello indica que quizá los ciclopígidos medraron en regiones mesopelágicas, la zona de penumbra que existe justo debajo de la zona fótica del océano, y sus restos se acumularon después de muertos junto con los de trilobites bentónicos ciegos. Curiosamente, las lentes de algunos de estos moradores de aguas profundas no eran hexagonales sino cuadradas; desconocemos aún las razones de esta variación.

Bentónicos y pelágicos

En su mayoría, los trilobites pelágicos mostraban una morfología poco hidrodinámica; no debieron nadar muy deprisa. *Parabarrandia* y otros de mayor tamaño, en cambio, mostraban un perfil aplanado y la parte anterior de la cabeza prolongada en una "nariz" alargada, a la manera de algunos tiburones pequeños actuales. Estos trilobites se modificaron hasta adquirir forma de hidroala; ello les permitió nadar a mayor velocidad que sus contemporáneos de menor tamaño. Aunque parece probable que los trilobites nadadores más pequeños se alimentaran del fitoplancton y del zooplancton, es posible que los de mayor tamaño fueran predadores de crustáceos. Parece, pues, que los trilobites ocuparon diferentes nichos ecológicos, incluso en ambientes pelágicos.

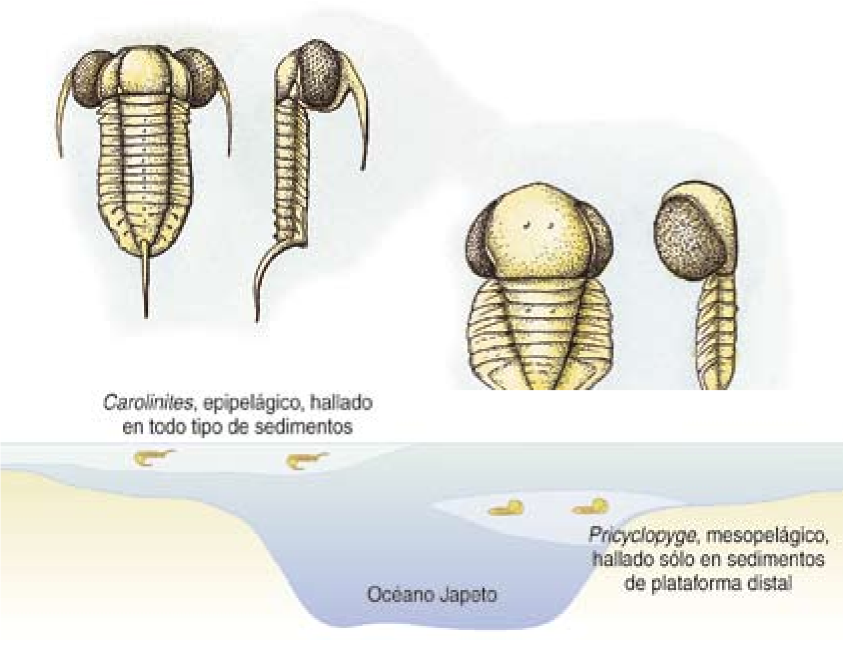
La mayoría de los trilobites medraban sobre el fondo del mar o en niveles próximos al mismo. No parecen haber ocupado ambientes dulceacuícolas; de haberlo hecho, podría haber hoy formas vivas. Estos habitantes de los fondos marinos variaban desde formas diminutas, cuyos adultos apenas superaban un milímetro, hasta gigantes de casi un metro de longitud. Tamaña divergencia responde a la diversidad de funciones que debieron asumir en la ecología del Paleozoico. Antaño se pensaba que todos los trilobites eran detritívoros, pero ahora se piensa que abarcaron casi toda la gama de formas de alimentación que muestran los artrópodos marinos modernos, a excepción del parasitismo, aunque incluso éste se ha postulado para un grupo concreto de trilobites.

Depredadores

Algunos trilobites, sobre todo los de mayor tamaño, fueron notables predadores y carroñeros; se considera ésta la condición más primitiva del grupo. Numerosos estudios acerca de sus relaciones filogenéticas los sitúan en un clado mayor que incluye al grupo basal de los arácnidos actuales —entre los cuales el cangrejo bayoneta (o herradura), *Limulus*, los escorpiones y las arañas constituyen ejemplos bien conocidos.

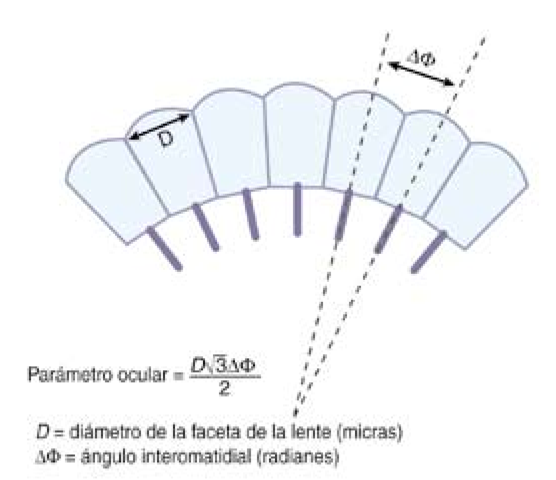
En su mayoría, los organismos de este grupo son carroñeros o depredadores de otros animales. Los apéndices de especies del Cámbrico inferior muestran unas bases fuertes y espinosas que podrían haber sido utilizadas para triturar gusanos de cuerpo blando y otras presas. Existen ejemplos fósiles en los que se observa cómo el rastro de un trilobites se aproxima al rastro de un gusano, para luego alejarse solo.

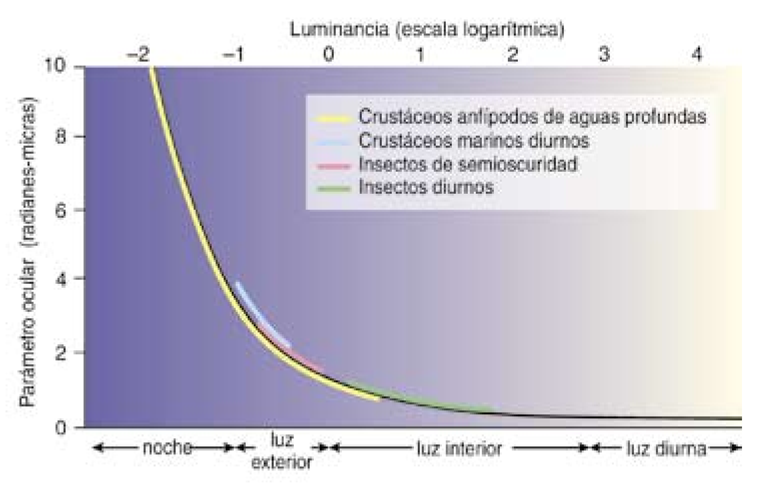
En la parte ventral de la cabeza de los trilobites se encontraba el *hipostoma*, una placa calcificada. La boca se situaba cerca de la porción posterior del hipostoma, que en trilobites predadores era rígido. Numerosas especies desarrollaron, en el hipostoma alrededor de la boca,



7. LOS TRILOBITES PELAGICOS ORDOVICICOS *Carolinites killaryensis* (*arriba a la izquierda*) y *Pricyclopyge binodosa* (*arriba a la derecha*) mostraban unos ojos grandes y abultados, con los que abarcaban un amplio campo visual. A tenor del tipo de sedimento en que se han hallado estos fósiles, *Carolinites* debió tratarse de una especie epipelágica que medraba cerca de la superficie del mar; *Pricyclopyge* un trilobites mesopelágico que habitaba profundidades por debajo de los 200 metros (*abajo*). Así lo sugiere también el tamaño de sus ojos, según el cual estas dos especies debieron medrar en profundidades oceánicas distintas, cada una con diferente luminancia (*véase la figura 8*).

CORTESIA DE DAVID L. BRUTON, UNIV. DE OSLO Y WINFRED HAAS, UNIV. DE BONN (*arriba*);
©EMMA SKURNICK, ADAPTADO DE T. McCORMICK Y R. A. FORTEY EN *PALEOBIOLOGY*, VOL. 24, PAGS. 235-253; 1998 (*abajo*)/*American Scientist*





8. EL "PARAMETRO OCULAR" mide algunas de las propiedades básicas de un ojo compuesto (*izquierda*); también proporciona información sobre la luminancia relativa del hábitat de un animal (*derecha*). A tenor del parámetro ocular, *Carolinites* y *Pricyclopyge* (*véase la figura 7*) debieron vivir en profundidades distintas: el de *Carolinites* no alcanza los 4 radianes-micras, comparable con el de los crustáceos marinos diurnos actuales; el de *Pricyclopyge* suele superar los 3 radianes-micras, lo mismo que los crustáceos anfípodos de aguas profundas modernos.

horquillas, engrosamientos u otras estructuras especiales, que probablemente ayudaban a despachar las presas voluminosas. Algunas especies mostraban incluso un raspador en la parte interna de la horquilla.

Un trilobites de gran tamaño debía constituir un enemigo temible para un gusano: para localizar las presas contaba con una amplia visión y el apoyo de los sensores químicos de las antenas. De las excavaciones de estos trilobites predadores nos han llegado huellas fósiles (*Rusophycus*), improntas de sus jornadas de caza.

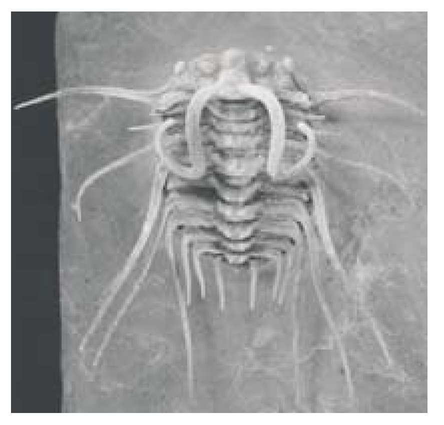
Presas

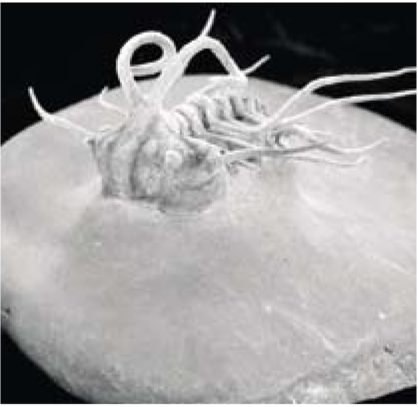
Numerosas pruebas respaldan la hipótesis de que los propios trilobites fueron también presas de otros animales. En los caparazones fósiles de trilobites a menudo se aprecian marcas de mordeduras; el hecho de que hayan cicatrizado indica, sin embargo, que los ataques no solían resultar mortales. Loren Babcock y Richard Robison comprobaron que en algunas poblaciones de trilobites cámbricos las mordeduras aparecían con mayor frecuencia en el lado derecho del animal; ello sugiere que el predador seguía siempre el mismo plan de ataque. Por lo que se refiere a la identidad del atacante, es muy probable que se tratara de otro artrópodo. De hecho, el estómago de un enigmático artrópodo del Cámbrico apareció lleno de restos de pequeños trilobites agnóstidos.

Un artrópodo de gran tamaño y dotado de mandíbulas impresionantes, *Anomalocaris*, descrito por vez primera en la cantera de pizarra Burgess (Canadá), debió haber sido el "tigre" de los mares cámbricos. Aunque sus ojos no estaban calcificados, gozaba de una buena visión.

En el Ordovícico, la lista de predadores potenciales aumentó con la aparición de los nautiloideos; en el Devónico, con los peces mandibulados. Quizá la proliferación de trilobites espinosos surgió en respuesta a la precariedad de la vida en el Paleozoico superior. Al enrollarse, estos trilobites dirigían sus espinas en todas direcciones, convirtiéndose en un bocado peligroso.

En general, sin embargo, los trilobites no mostraban un aspecto tan llamativo. De pequeño tamaño, a lo sumo de dos centímetros de longitud, un gran número de ellos pululaban sobre sedimentos fangosos en grupos de miles de individuos. Una cantera de Utah con estratos del Cámbrico medio ha proporcionado miles de ejemplares fósiles de *Elrathia kingi*, uno de estos trilobites; hoy se pueden adquirir en forma de pequeños "medallones" en tiendas de museos de todo el mundo. Con un cuerpo aplanado y un gran número de segmentos torácicos, estos animales medraron sobre el fondo marino y mantuvieron su morfología a lo largo de más de 200 millones de años.

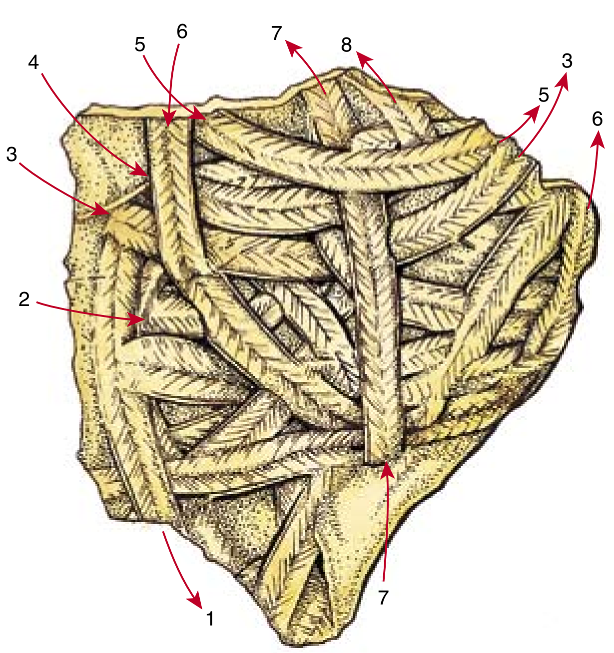




9. *DICRANURUS MONSTRUOSUS*, del Devónico de Marruecos, estaba dotado de una armadura cubierta de espinas, que le protegía de los "recién" evolucionados peces mandibulados y otros depredadores. El tipo de hipostoma de *Dicranurus* sugiere hábitos predadores; se alimentaba de gusanos, a buen seguro.



10. *CYPHASPIS*, un trilobites detritívoro del Devónico, rastreaba el fondo del mar en busca de partículas orgánicas, su alimento. De su raquis torácico emergían unas espinas de gran longitud y de la parte frontal del cefalón unos "cuernos", cuya función se desconoce.



11. ESTA "TRAZA ALIMENTARIA" (el icnosfósil *Cruziana semiplicata*) fue producida por un trilobites del Cámbrico superior cuando removía el sedimento en busca de comida. Los números identifican surcos individuales antihorarios.

Un diseño morfológico conservador, aunque eficaz, sin la menor duda.

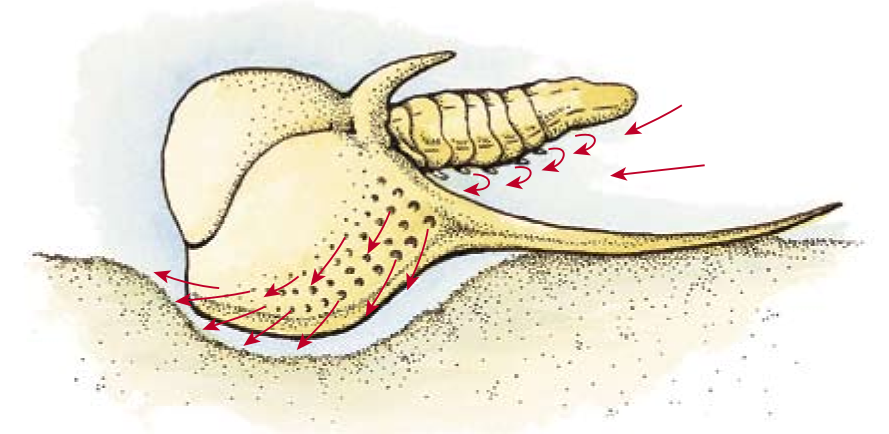
El hipostoma de estos pequeños trilobites no estaba adosado de forma rígida, sino soportado por una membrana ventral flexible; operaba quizá como una pala, facilitando la ingestión de sedimento blando, del cual el animal extraía su alimento (partículas orgánicas). Los surcos que estos mismos trilobites han dejado en la superficie del sedimento (icnofósil *Cruziana semiplicata*) parecen diminutas roderas entrecruzadas. Algunas especies incluso habrían desarrollado estrategias alimentarias particulares: por ejemplo, dar vueltas en círculo una y otra vez para incrementar la eficacia de la captación del alimento.

Algunos grupos de trilobites, parientes próximos de los detritívoros, adoptaron una forma de vida propia de ambientes pobres en oxígeno. Las rocas que se formaron a partir de estos hábitats anaeróbicos son pizarras negras y calizas ricas en sulfuros —estas últimas se denominan también "rocas fétidas" debido al desagradable olor a sulfuro que desprenden al fragmentarse. Tales trilobites, sobre todo la familia Olenidae, tenían un exoesqueleto muy fino en relación con su tamaño. Además, estarían dotados de una musculatura débil que les obligaba a moverse con lentitud. Sin embargo, a diferencia de los pelágicos, los trilobites olénidos contaban con áreas laterales (pleurales) anchas y aplanadas; presentaban un elevado número de segmentos torácicos. Ello les permitió incrementar el número de ramas branquiales (respiratorias) y sobrevivir así en ambientes de bajo contenido en oxígeno.

Relación simbiótica con las bacterias

Existen numerosos ejemplos actuales de animales especializados en habitar medios pobres en oxígeno que pros-

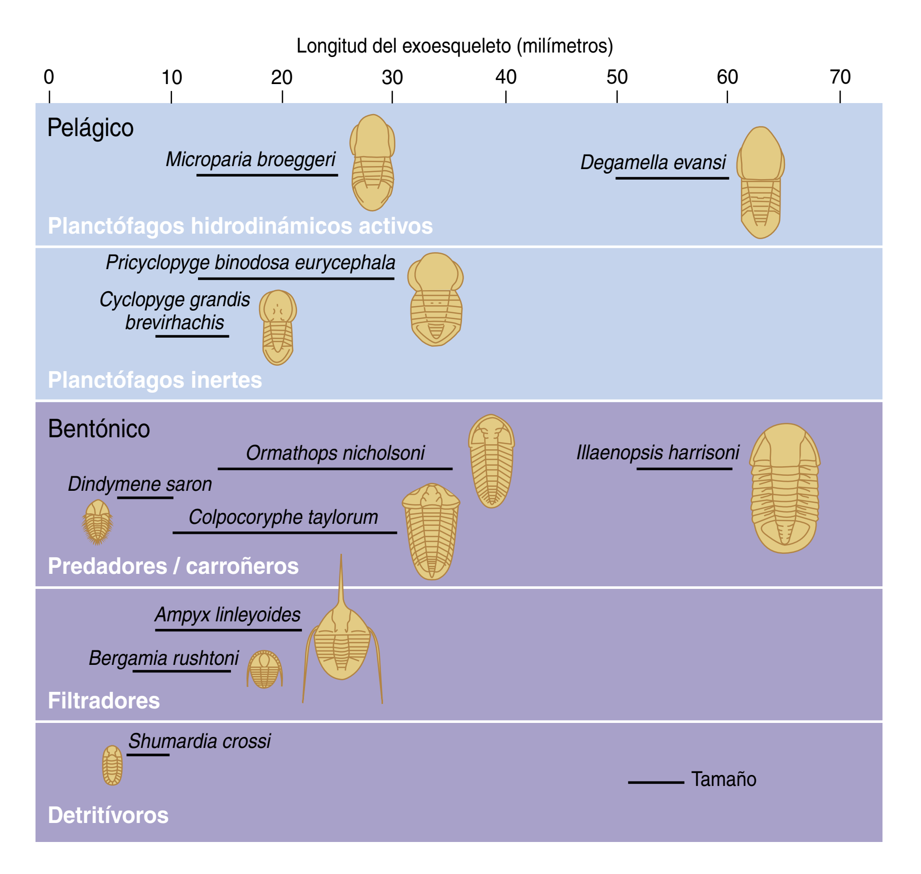




12. *CRYPTOLITHUS TESSELATUS* formaba una cámara de alimentación y filtración bajo su cuerpo. Capturaba las partículas orgánicas en las corrientes de agua (*las flechas rojas indican trayectorias hipotéticas*) generadas por el movimiento de sus apéndices. El agua salía entonces de la cámara a través de las aberturas del cefalón. *Cryptolithus* vivió en Norteamérica durante el Ordovícico.



13. ESTA ASOCIACION DE 11 ESPECIES contemporáneas de trilobites hallada en una cantera de Whitland, Gales del Sur, pone de manifiesto la diversidad que podía existir en un solo enclave. Estos trilobites del Ordovícico inferior lograban coexistir porque seguían diferentes hábitos alimentarios (según su morfología y tamaño corporal) y medraban a distintas profundidades.



peran merced a una relación simbiótica con bacterias sulfurosas. Estos animales "crían" a las bacterias de las que luego se alimentan. Algunos bivalvos, por ejemplo, alojan bacterias sobre sus branquias modificadas y absorben directamente sus nutrientes. Resulta plausible que los trilobites que medraban en medios pobres en oxígeno adoptaran estrategias parecidas; por tanto, la relación simbiótica con bacterias se vendría produciendo ya desde el Cámbrico.

Los restos fósiles de estos trilobites forman verdaderos cementerios en los que no suelen encontrarse más de dos especies asociadas. Algunas de estas especies muestran degeneración del hipostoma; ello abona la hipótesis de que pudiesen absorber a través de las branquias los nutrientes generados por las bacterias. Los trilobites más especializados de este grupo desarrollaron unas espectaculares protuberancias bulbosas en la parte frontal de la cabeza; quizá servían para albergar a las larvas en los estadios iniciales de su crecimiento, hasta que alcanzasen el tamaño adecuado para establecerse en su propio simbionte.

Otro grupo de trilobites bentónicos generó alrededor de la cabeza una orla muy peculiar, que no se corresponde con nada conocido entre los artrópodos actuales. En numerosas especies, este borde aparece perforado por unos canales que se abren en el exoesqueleto dorsal y en el doblez ventral. Los bordes se prolongan a menudo hacia atrás en unas largas espinas a lo largo del tórax, de forma que el animal podría sostenerse sobre el fondo apoyado en ellas. Esta extraña adaptación debió tener un gran éxito evolutivo, ya que los trinucleidos, una de estas familias de trilobites ordovícicos, suelen hallarse en abundancia.

La observación lateral de este diseño proporciona indicios sobre su función: el tórax se mantenía sobre el sedimento, sin tocarlo, de forma que dejaba una cámara por debajo de él, flanqueada por las espinas; el hipostoma (y, por tanto, la boca) se mantenía muy por encima del fondo. Es probable que estos trilobites removieran el sedimento, "saltando" de un lado a otro, para filtrar las partículas en suspensión. Abona esta idea el descubrimiento de huellas que se corresponderían con este tipo de comportamiento, es decir, las marcas dejadas cuando el animal estaba en reposo sobre el fondo y las del salto en busca de mejor sedimento.

Los mares paleozoicos estaban plagados de trilobites de todo tipo. Especies de gran tamaño se arrastraban sobre el fondo, aprovechando su agudeza visual para detectar las presas; algunos removían el sedimento para filtrar las partículas en suspensión; otros araban las capas más superficiales en busca de alimento. Empezamos a ahondar en la complejidad y la diversidad de un grupo de animales "primitivos". De no haber sido por la extinción pérmica, quizás estarían aún entre nosotros.

El autor

Richard A. Fortey, investigador del Museo de Historia Natural de Londres, enseña paleobiología en la Universidad de Oxford. Sus estudios actuales se centran en la "explosión" del Cámbrico, la evolución de la visión de los artrópodos y la paleogeografía de continentes antiguos.

Bibliografía complementaria

TRILOBITE: EYEWITNESS TO EVOLUTION. R. A. Fortey. Knopf; Nueva York, 2000.

AVAILABLE GENERIC NAMES FOR TRILOBITES. P. A. Jell y J. M. Adrain en *Memoirs of the Queensland Museum*, vol. 48, págs. 331-553; 2003.

TRILOBITES AND THEIR RELATIVES. Dirigido por P. D. Lane, R. A. Fortey y D. J. Siveter en *Special Papers in Paleontology*, vol. 70; 2003.

La burbuja local y la Tierra

Rodeado por una burbuja de gas, el Sol se halla en medio de una región de baja densidad en el medio interestelar. La influencia de esa estructura alcanza la capa de ozono y repercute en la biosfera

Jesús Maíz Apellániz, Narciso Benítez y Matilde Cañelles

Estrellas y planetas ocupan una fracción despreciable del volumen de una galaxia. La mayor parte del espacio corresponde al medio interestelar (MIE). Y si bien las densidades medias de estrellas y planetas se parecen, por lo general, a las de los objetos que encontramos a nuestro alrededor, en el caso del MIE éstas son entre 20 y 25 órdenes de magnitud menores. No resulta, pues, extraño encontrarse regiones con 1 átomo o menos por centímetro cúbico de volumen: una densidad muy inferior a las de cualquier vacío conseguido en la superficie terrestre por medios artificiales.

Tan baja densidad no debe inducirnos a pensar que se trata de un medio de estructura sencilla y, por lo tanto, fácil de estudiar. La realidad nos demuestra lo contrario. Existen diversos procesos violentos —así, los vientos estelares, la radiación ionizante de las estrellas calientes y las explosiones de supernova— que inyectan ingentes cantidades de energía y provocan la dispersión, o la concentración, del material. Este, sometido a su autogravedad, puede dar lugar a la formación de estrellas, que vuelven a inyectar energía al medio, completándose así un ciclo de violencia.

En razón de esos procesos, el medio interestelar puede adquirir una morfología muy complicada, en la que aparezcan burbujas y túneles de baja densidad y nubes y filamentos de alta densidad que, en algunos casos, engendran estructuras casi fractales. Además, como ocurre a menudo en astronomía, sólo podemos estudiar los objetos del MIE por la luz que emiten, absorben o dispersan. La baja densidad del medio interestelar hace que vastas regiones sean punto menos invisibles y necesitemos recurrir a diversos rangos del espectro electromagnético para estudiarlas. Hay en particular determinados componentes del MIE escurridizos; no bastan nuestros medios técnicos para detectarlos con precisión.

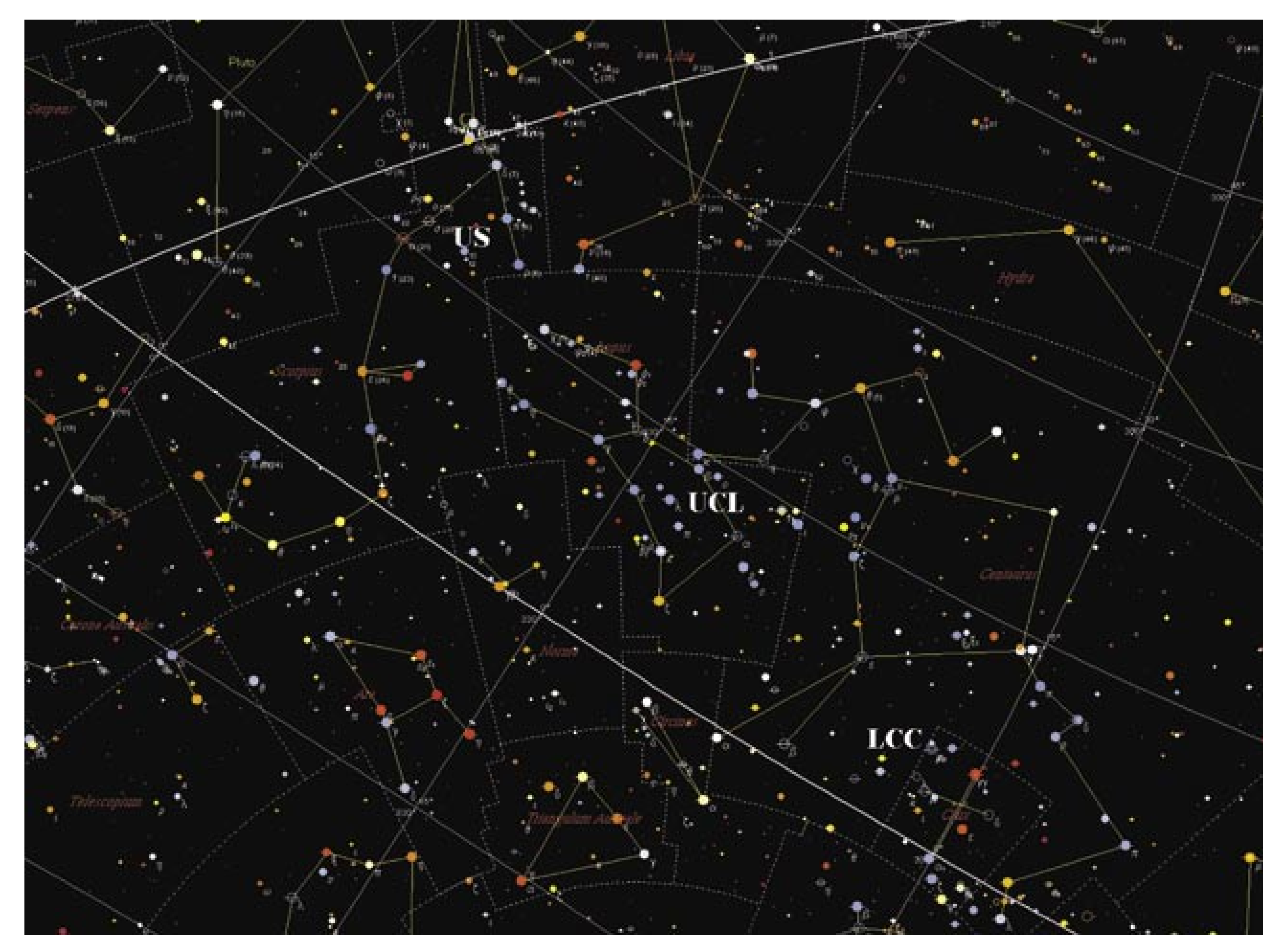
Por último, se ha hacer frente al problema de la medición de las distancias, ubicuo en astronomía incluido el estudio del medio interestelar. En algunos casos, no es que sea difícil determinar cuán lejos se encuentra un objeto, sino que ni siquiera se sabe si se halla en la vecindad solar o en los confines de la galaxia.

Avances

No obstante, se han dado pasos de gigante en el conocimiento del medio interestelar a lo largo de los últimos tres decenios. Buena parte de ese progreso se debe a la apertura de nuevos rangos del espectro electromagnético (infrarrojo lejano, ultravioleta, rayos X y gamma), que ha aportado la observación astronomía desde el espacio. A esto se ha añadido la existencia de nuevos tipos de detectores, técnicas de observación y modelos numéricos, para llegar hoy a una descripción general bastante precisa del MIE, en la que sólo quedan algunos detalles y magnitudes por aclarar.

Podemos indicar la existencia de varios componentes o fases del medio interestelar. En la fase fría, el gas (fundamentalmente hidrógeno) se encuentra en forma molecular o atómica neutra a temperaturas entre 10 y 100 grados kelvin, con densidades superiores a 10 átomos por centímetro cúbico. En la fase templada el hidrógeno se halla en estado neutro o total o parcialmente ionizado a temperaturas en torno a los 10.000 K y densidades entre 0,1 y 10 átomos por centímetro cúbico. Por último, en la fase caliente el gas está enteramente ionizado a temperaturas cercanas al millón de K y densidades inferiores a los 0,1 átomos por centímetro cúbico.

Desde mediados del siglo pasado se sabe que el Sol ocupa una región poco densa del medio interestelar. En un radio de 100 parsec (un parsec equivale a 3,26 años-luz), la luz emitida por las estrellas apenas sufre atenuación. Con otras palabras, el camino que sigue dicha luz para



1. SCORPIUS-CENTAURUS ocupa una porción considerable del cielo austral. Los tres subgrupos de Scorpius Centaurus aparecen marcados por sus iniciales en inglés: US, que corresponde a Scorpius Superior; UCL designa a Centaurus Superior Lupus, y LCC a Centaurus Inferior Crux. En la carta el norte está hacia arriba y el este hacia la izquierda. Las líneas que forman una malla ortogonal son las curvas de latitud y longitud galácticas constantes, con el ecuador galáctico representado en un trazo más grueso. La línea gruesa que cruza el cuadrante superior izquierdo es la eclíptica. La parte inferior de la esfera celeste que se muestra en esta figura sólo puede observarse desde latitudes inferiores a las de la península Ibérica.

JESUS MAIZ APELLANIZ, NARCISO BENITEZ Y MATILDE CAÑELLES

llegar a nosotros se halla limpio de polvo; en consecuencia, la intensidad de la radiación recibida disminuye simplemente con el cuadrado de la distancia.

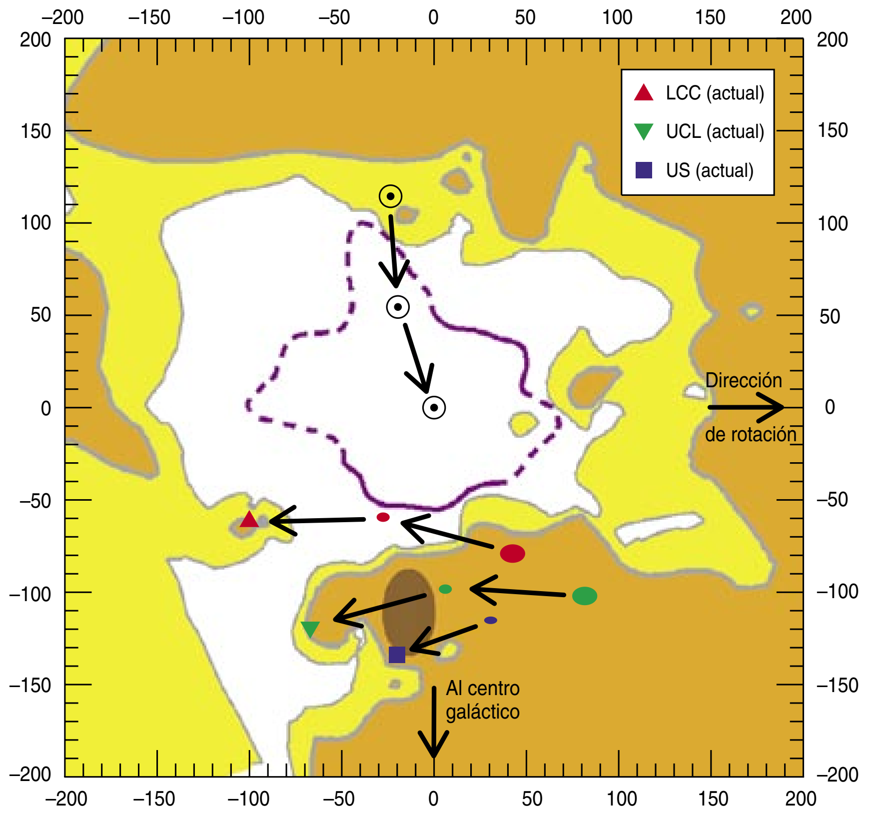
Ahora bien, existen regiones en nuestra galaxia cuya luz visible no nos llega por la interposición de grandes cantidades de polvo. (En realidad en ello estriba la causa de que nos esté vedada, al menos en luz visible, la mayor parte de la galaxia.) El polvo suele concentrarse en las regiones de gas más denso (en la fase fría del medio interestelar), las llamadas nubes moleculares, que son los lugares donde se forman nuevas estrellas.

En esa correlación entre la densidad del gas y la presencia de polvo en el MIE, se basaba la conclusión de que el Sol residía en una región de baja densidad, la denominada "cavidad local". Desde los años setenta del siglo pasado quedó establecido que el volumen cercano al sistema solar emitía en rayos X blandos (de energía entre 0,1 y 1 kiloelectronvolt). Para que el medio interestelar produzca esa radiación, se requiere que exista un volumen apreciable ocupado por su fase caliente (a temperaturas cercanas al millón de grados kelvin). A la fase en cuestión, por analogía con las condiciones existentes en la capa más externa de nuestra estrella, se la denomina gas coronal. Ese gas coronal constituiría la "burbuja local" y ocuparía parte o todo el espacio de la cavidad local.

El término "cavidad" se utiliza en las definiciones anteriores para identificar la ausencia de algo (polvo y, como consecuencia, gas denso) mientras que el vocablo "burbuja" designa la presencia de una substancia (gas coronal). La fase ocupada por el gas coronal no extingue la luz estelar: su densidad es demasiado baja; su estado de ionización, demasiado alto (lo que reduce la presencia de líneas de absorción en luz visible), y temperatura, alta en exceso (destruye las partículas de polvo).

Origen de la burbuja local

¿A qué se debe que el Sol se halle en el interior de una burbuja de gas coronal? Estas burbujas empiezan a formarse cuando una estrella dotada de gran masa emite un viento estelar de alta velocidad que barre hacia fuera el material circundante.



2. PROYECCION, sobre el plano de la galaxia vista desde el polo norte galáctico, de diversos objetos y estructuras mencionadas en el texto. El centro galáctico se encuentra hacia abajo, la dirección de rotación galáctica apunta hacia la derecha y los ejes de coordenadas se miden en parsecs con respecto a la posición actual del Sol. El sistema de coordenadas utilizado gira alrededor del centro galáctico con la velocidad media del entorno solar, por lo que se puede interpretar como un sistema localmente en reposo. Las posiciones actuales y de hace 5 y 10 Ma de nuestra estrella se hallan representadas con el símbolo solar (⊙). Los símbolos descritos en la leyenda representan las posiciones actuales de los centros de los tres subgrupos de Scorpius-Centaurus. Para LCC y UCL se muestran además las posiciones respectivas de hace 5 y 10 Ma; para US, la de hace 5 Ma (US no se había formado hace 10 Ma). Las elipses utilizadas para representar las posiciones anteriores de los centros de los subgrupos indican sus respectivas incertidumbres. Los contornos rellenos de blanco, amarillo y naranja indican la densidad del MIE a partir de los datos de absorción de luz por el sodio neutro. El contorno morado define la extensión probable del volumen ocupado por el gas coronal de la burbuja local medida a partir de la emisión de rayos X blandos. Por último, la elipse marrón indica la posición actual de la nube molecular de ρ Ophiuchi.

JESUS MAIZ APELLANIZ, NARCISO BENITEZ Y MATILDE CAÑELLES

Cuando una de estas estrellas llega al final de su vida, explota constituida en supernova y expulsa sus capas exteriores; se mueven éstas a gran velocidad y acaban chocando con el material barrido por el viento. Este material, en virtud del choque, sufre una nueva aceleración. Entonces, la burbuja encerrada en su interior se expandirá hasta alcanzar un radio de decenas de parsecs. Esta es la explicación más plausible sobre cómo se formó la burbuja local; con una salvedad: el radio, entre 75 y 100 parsecs, resulta demasiado grande como para haber sido producida por una única supernova (*véase la figura 2*). Los modelos numéricos hablan de un mínimo de tres explosiones de supernova en el interior de la burbuja local en los últimos 10 millones de años para que haya alcanzado su tamaño actual.

Explosiones de supernova

¿Cuáles fueron esas tres o más estrellas que explotaron y, al hacerlo, originaron la burbuja local? No es tarea fácil identificarlas. Por varias razones. En primer lugar, cuando una estrella masiva explota constituida en supernova deja por residuo una estrella de neutrones, un objeto difícil de detectar por culpa de su bajo brillo en luz visible, en particular tras enfriarse con el tiempo. En ciertas circunstancias se puede descubrir una estrella de neutrones gracias a su emisión de rayos X o de ondas de radio; en muchas otras, resulta imposible con los medios hoy disponibles.

Además de su débil luminosidad, el incremento de velocidad registrado por la estrella de neutrones complica su detección. En efecto, la explosión de supernova no solamente expulsa las capas exteriores a gran velocidad en todas las direcciones, sino que puede también impulsar a gran velocidad (cientos de kilómetros por segundo) a la propia estrella de neutrones. Por tanto, transcurridos escasos millones de años de la explosión, la estrella de neutrones podría ya encontrarse a cientos de parsecs de distancia, lo que dificultaría la asociación de la estrella con los efectos de la supernova. Por último, tampoco resulta fácil medir la distancia y la velocidad radial de las estrellas de neutrones. Un contratiempo más.

Una opción alternativa a la identificación de las estrellas de neutrones que originaron la burbuja local nos la ofrece la relación de las propiedades generales de sus progenitores. La investigación estadística habrá de decirnos si el hecho de que nos encontremos en medio de una burbuja constituye un suceso frecuente o no en la historia de una estrella de tipo solar.

En función de su localización clasificamos las estrellas dotadas de gran masa en dos grupos principales: las que se encuentran más o menos aisladas y las que se integran en cúmulos o asociaciones OB. Estas últimas comprenden grupos formados por docenas de estrellas jóvenes, masivas y calientes de tipos espectrales O y B, que se hallan en los brazos espirales de las galaxias. Las asociaciones OB alcanzan decenas o centenas de años luz de longitud.

En el interior de la burbuja local no aparecen ahora asociaciones de ese tipo. Ello indujo a pensar que los progenitores de las supernovas de la

burbuja local serían estrellas masivas aisladas. Pero la hipótesis tiene su talón de Aquiles en la escasez de estrellas aisladas: la probabilidad de que tres de ellas exploten en el volumen de la burbuja local en el plazo de 10 millones de años —tiempo de vida estimado de la burbuja— se cifra en un escueto 5 %.

En medio de la burbuja

Ante esos datos, algunos astrónomos consideran que nuestra situación en el medio interestelar constituye un feliz azar: contamos sólo con una probabilidad entre veinte de estar, en un determinado momento, en el interior de una burbuja grande creada por estrellas dotadas de gran masa y aisladas y resulta que nos ha tocado justamente ahora.

Nuestra fortuna no termina ahí. De haberse desarrollado nuestra civilización cuando el Sol se hallara en una región del medio interestelar más característica habrían existido rangos del espectro electromagnético (como el ultravioleta extremo) que nos hubieran estado vedados para la observación astronómica. Todavía más: de vivir en medio de una región densa (una nube molecular) nuestro cielo carecería de estrellas visibles, aunque sería muy brillante en el infrarrojo y en las ondas milimétricas.

¿Pudo originarse de alguna otra forma la burbuja local? Acabamos de afirmar que no existe ninguna asociación OB en su interior, pero eso no tuvo por qué ser necesariamente cierto en el pasado. Hasta hace poco, no podíamos trazar las trayectorias históricas de las asociaciones OB cercanas. Pero la situación cambió en los últimos diez años gracias a la misión Hipparcos de la Agencia Espacial Europea. La sonda midió las distancias y los movimientos propios (velocidades angulares en el plano del cielo) de las estrellas de la vecindad solar y nos permitió conocer con precisión las posiciones absolutas de los objetos de nuestro entorno galáctico más inmediato.

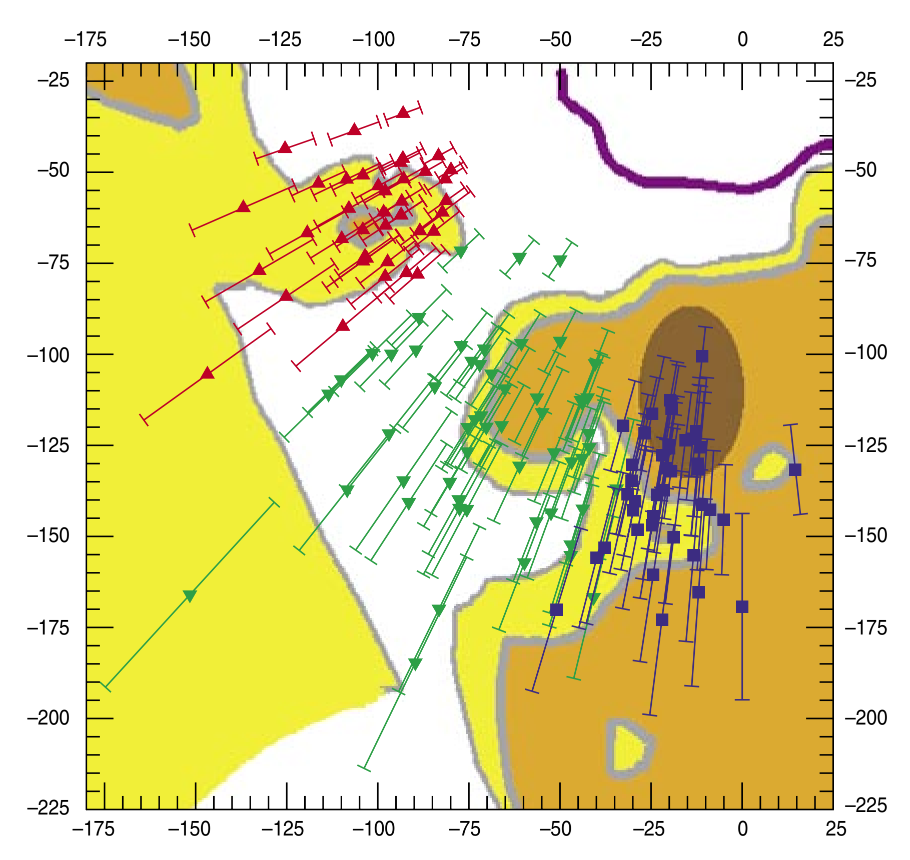
Utilizando los datos de Hipparcos, publicados por Tim de Zeeuw y sus colaboradores y por otros grupos, nos pusimos a identificar posibles asociaciones OB que hubieran cruzado la burbuja local en los últimos 10 millones de años y producido supernovas en ese mismo intervalo. Para ello, era necesario combinar los datos de Hipparcos con otros datos medidos desde la superficie terrestre —así, las velocidades radiales y los tipos espectrales de las estrellas de cada asociación—, información recabada ya por diversos autores. Además, también hacía falta calcular las desviaciones inducidas por el potencial galáctico, pues la trayectoria de una estrella del disco de la galaxia no es una simple circunferencia alrededor del centro galáctico; las estrellas oscilan en la dirección perpendicular al plano de la galaxia y describen epiciclos retrógrados en éste.

Subgrupos de la asociación Sco-Cen

Armados con esos datos descubrimos que parte de la asociación OB Scorpius-Centaurus (o Sco-Cen), ubicada ahora justo fuera de la cavidad local, residió en su interior en el transcurso de buena parte de los últimos 10 millones de años. Sco-Cen es la asociación OB más próxima a nosotros, cercanía que le hace abarcar una región muy amplia del cielo (*figura 1*); consta de tres subgrupos, cuyos acrónimos en uso se corresponden con sus nombres en inglés: Scorpius Superior (US), Centaurus Superior Lupus (UCL) y Centaurus Inferior Crux (LCC).

Los centros de cada subgrupo, tanto en la actualidad como en el pasado, aparecen representados en la figura 2. Para hacerse una idea de la extensión de cada subgrupo, podemos reparar en las posiciones de algunas de sus estrellas OB en la figura 3. Dos de los tres subgrupos que componen Sco-Cen, UCL y US, se han mantenido fuera de la extensión actual de la cavidad local durante los últimos 10 millones de años. Sin embargo, LCC está en estos momentos saliendo de la cavidad, tras haber pasado en la región definida por su extensión actual unos siete u ocho millones de años.

¿Pudo LCC haber producido la burbuja local? Para contestar a esa pregunta era necesario calcular cuántas supernovas habían estallado en



3. AMPLIACION DE UN FRAGMENTO de la figura 2 en la que se muestran las posiciones individuales actuales (con sus incertidumbres) de algunas de las estrellas OB de Scorpius-Centaurus. El color y el símbolo utilizado para cada estrella indican su pertenencia a un subgrupo determinado según el código establecido en la figura 2.

JESUS MAIZ APELLANIZ, NARCISO BENITEZ Y MATILDE CAÑELLES



4. ANTARES (α SCORPII) Y SU ENTORNO. Antares, la próxima estrella que probablemente explotará como una supernova en Scorpius-Centaurus aparece en esta imagen en el cuadrante superior izquierdo. Su luz de marcado tinte anaranjado se refleja en las nubes existentes a su alrededor. La estrella azulada rodeada de una nebulosidad rojiza situada abajo, casi en el centro de la imagen es σ Scorpii, otro miembro de Scorpius-Centaurus. Sin embargo, el cúmulo globular M4 (*cuadrante inferior izquierdo*) se halla a una distancia muy superior y no guarda relación física con la asociación OB.

ADAM BLOCK/NOAO/AURA/NSF

dicho subgrupo desde su formación. Había que analizar, para ello, cuántas estrellas de gran masa y de masa intermedia pertenecen en la actualidad a LCC y averiguar su edad; de ese modo, podríamos calcular cuántas estrellas masivas no habían explotado todavía.

Centaurus superior y Centaurus inferior

Rastreando la bibliografía pertinente y calculando otros datos por nuestra cuenta hallamos que LCC se formó hace unos 11-12 millones de años (UCL hace 14-15 Ma y US hace 5-6 Ma). El número de estrellas que faltan en dicho subgrupo, por haber explotado ya como supernovas, se cifra en torno a seis (13 en el caso de UCL y una, en US). Por lo tanto, el número de supernovas que han tenido lugar en LCC en los últimos siete millones de años parece suficiente para haber producido la burbuja local.

Para verificar que nuestros cálculos eran correctos, convenía encontrar alguna confirmación independiente de la explosión de esas seis supernovas (en torno a la veintena, si atendemos a la asociación completa). ¿Cómo? Descubriendo estrellas fugitivas. Aparece una estrella de ese tipo cuando se produce una supernova en un sistema binario en el que las dos estrellas se hallan a corta distancia una de la otra. Como resultado de la explosión, la primaria se convierte en una estrella de neutrones y sale disparada a gran velocidad; la secundaria sufre un destino similar en una dirección aproximadamente opuesta. Esta secundaria se convierte en una estrella fugitiva que avanza por la galaxia a velocidades en torno a los 100 kilómetros por segundo.

Dado que las estrellas fugitivas siguen teniendo una luminosidad similar a la de otras estrellas, cuesta mucho menos detectarlas que a las estrellas de neutrones. Constituyen, pues, unos marcadores de supernovas pasadas mucho más eficaces que las estrellas de neutrones. Pero hay un inconveniente: sólo los sistemas binarios cercanos producen estrellas fugitivas. Por tanto, con ese método sólo se detectan entre el 10 % y el 40 % del total de supernovas.

Existen cinco estrellas fugitivas cuyo origen se puede trazar hasta Sco-Cen: dos en LCC, otras dos en UCL y una en US. La estrella fugitiva de US reviste particular interés. Se trata del único caso confirmado en el que también se ha detectado la estrella de neutrones asociada y se ha podido establecer con precisión que la explosión tuvo lugar hace un millón de años, fecha que concuerda a la perfección con los modelos de evolución de US.

Se ha detectado también una segunda estrella de neutrones, expulsada de US (sin que existiera estrella fugitiva aparente, probablemente por no haber ocurrido la explosión en un sistema estelar binario cercano) y hay una estrella supergigante roja (*véase la figura 4*) que debería explotar en breve, es decir, en el intervalo de unos cientos de miles de años. Se confirma, en consecuencia, que Sco-Cen ha dado lugar a un número elevado de supernovas.

Preguntas e hipótesis

Llegados a este punto, en el que hemos visto que Sco-Cen estuvo en el lugar oportuno en el momento apropiado y que produjo hasta más supernovas de las necesarias, deberíamos plantearnos las cuestiones siguientes: ¿Por qué no es mayor la burbuja local? ¿Por qué no está centrada en la posición de Sco-Cen?

Sin información suficiente para dar una respuesta definitiva, podemos aventurar una posibilidad. Por un lado, existe otra cavidad adyacente a la local (*cuadrante inferior izquierdo de la figura 2*). El origen del Anillo I, como se conoce la cavidad, se había ya adscrito con anterioridad a Sco-Cen; la información aquí presentada, coherente con esa hipótesis, tiende a asignar la responsabilidad más específica al subgrupo UCL. Por otro lado, la nube molecular de ρ Ophiuchi (*véase la figura 2*) es, con seguridad, el vestigio de la nube molecular original que dio lugar a todo Sco-Cen y a su derecha (en esa misma figura) se extiende el complejo de nubes moleculares de Aquila. Dada esta relación, es muy probable que dichas nubes moleculares compartan el movimiento general de Sco-Cen y se estén desplazando de derecha a izquierda en la figura 2. Si así fuera, resulta muy probable que

en una primera fase de existencia de la burbuja local, hace 5-10 Ma, ésta ocupara un volumen mucho mayor y formara una sola estructura con el Anillo I.

La superburbuja así constituida se habría expandido, con respecto a sus progenitores en Sco-Cen, hacia arriba y hacia la izquierda en la figura 2, pero no hacia abajo y hacia la derecha; se debería ese comportamiento a la propia presencia de la nube molecular, que habría actuado como un obstáculo contra la expansión (dichas expansiones asimétricas se observan con frecuencia en burbujas similares). Más tarde, el movimiento de la nube molecular habría cerrado parcialmente la conexión entre las dos burbujas para llegar a la situación actual, con dos cavidades aparentemente separadas. Esta hipótesis es compatible con algunas observaciones que indican que la burbuja local estaría empezando a colapsar. Tal deriva sería de esperar si la asociación responsable de las supernovas estuviera abandonando la burbuja (como así es) y ésta se hallara quedando aislada. En esas circunstancias, el gas de la burbuja perdería presión al enfriarse y el medio circundante volvería lentamente a su posición original.

Los efectos sobre la Tierra

La Tierra se encuentra ahora próxima al centro de la burbuja local. Pero, ¿qué distancia mediaba entre nuestro planeta y las violentas explosiones que formaron la cavidad? Para responder a esta cuestión, debemos combinar la trayectoria pasada de Sco-Cen, calculada a partir de las paralajes de Hipparcos, con el movimiento de la Tierra respecto al sistema de referencia galáctico. El resultado para cada uno de los subgrupos que forman Sco-Cen se muestra en la figura 5. En su punto más cercano, hace dos o tres millones de años, el centro de LCC se encontraba a sólo 100 parsecs del sistema solar. Si se tiene en cuenta que el tamaño de estos subgrupos puede alcanzar 60 parsecs o más, resulta verosímil que alguna de las supernovas de Sco-Cen estallara en el pasado a tan sólo 40 parsecs de la Tierra.

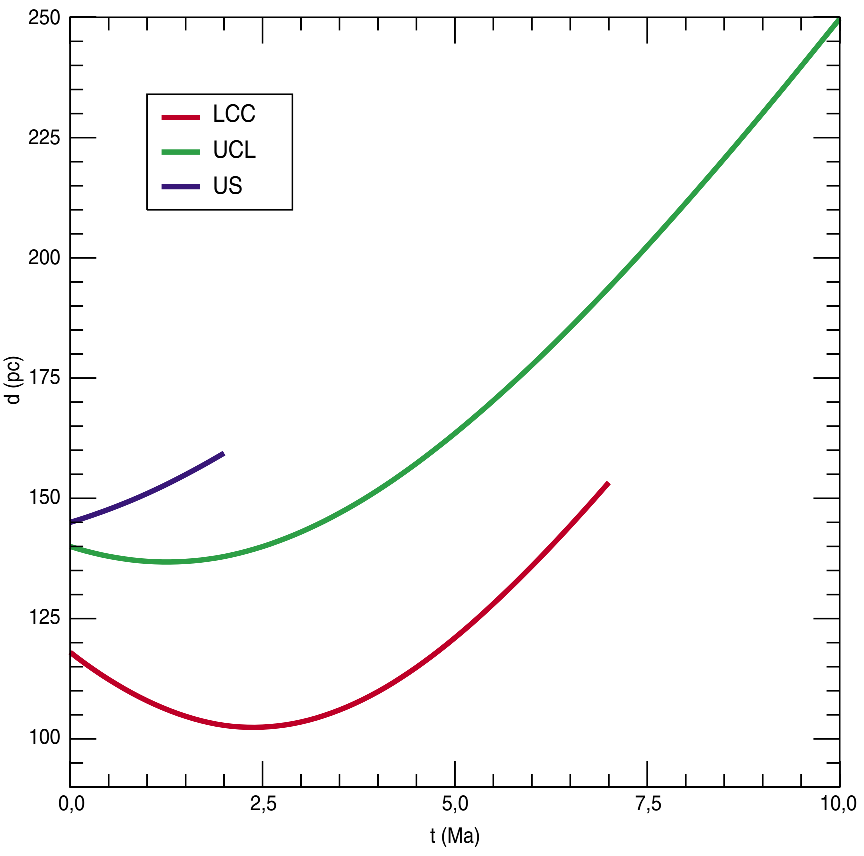
Un evento semejante podría dejar una sutil, aunque inconfundible, huella en nuestro planeta, en forma de elementos químicos poco frecuentes producidos por la explosión. Según se adelantó, el violento estallido arroja al espacio las capas exteriores de la supernova, que arrastran consigo el medio interestelar circundante: crean una envoltura aproximadamente esférica en expansión.

Andando el tiempo esa estructura se enfría, interacciona con el MIE y adopta una forma más irregular. Al aumentar la distancia con respecto a su origen y, por tanto, el área sobre la que se extiende, se vuelve cada vez más tenue hasta que su expansión termina por detenerse e incluso puede llegar a retroceder ligeramente ante la presión del MIE en el que se encuentra inmersa.

Una vez en el sistema solar, le queda a este material un último obstáculo a superar antes de llegar a la Tierra: la presión del gas contenido en la burbuja producida por la supernova debe ser mayor que la presión del viento solar a la altura de la órbita terrestre. Que esto sea así depende de varios factores, entre ellos la distancia entre la supernova y la Tierra y su orientación con respecto al Sol. Aunque las configuraciones favorables parecen poco probables debido a la relativa lejanía de la asociación Sco-Cen, hay claros indicios de que algunos elementos químicos generados en la explosión, y en particular el hierro, se condensarían en forma de polvo, y podrían llegar hasta nuestro planeta perforando la barrera del viento solar con mucha mayor facilidad.

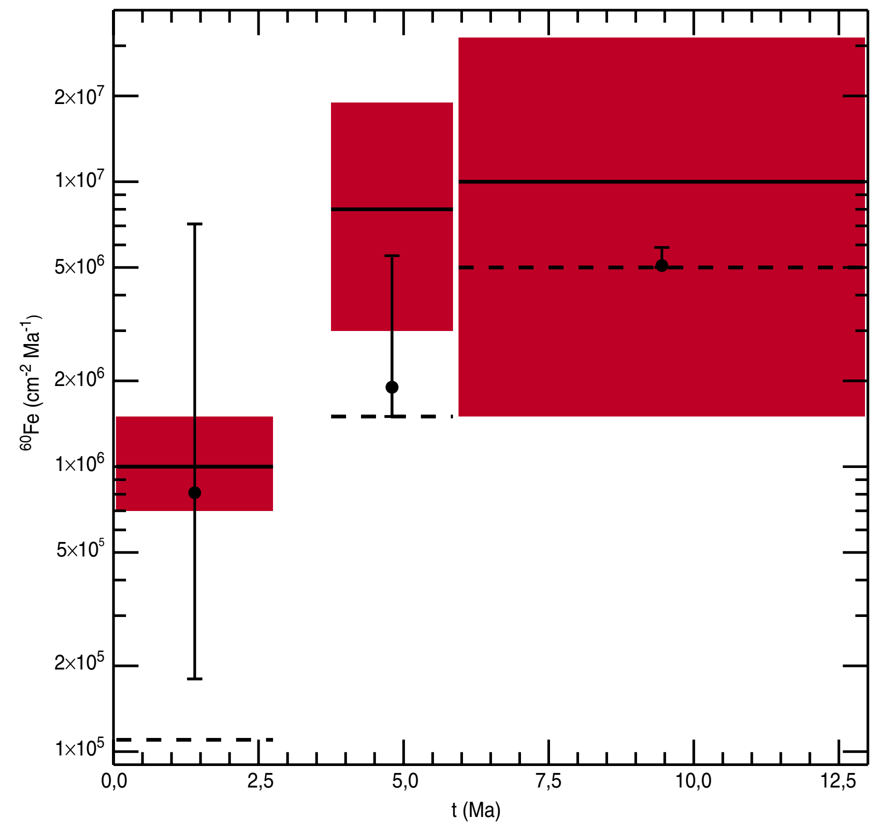
Elementos e isótopos

La mayoría de los elementos producidos por la supernova serían indistinguibles de otros existentes en la Tierra. No olvidemos que una buena porción de nuestros propios átomos se han originado en un proceso similar. Si indistinguibles, también imposible atribuirlos a una explosión reciente. Por suerte, existen varios isótopos con tasas altas de desintegración radiactiva que son sumamente escasos, si no inexistentes en la Tierra, y cuya única fuente de producción en cantidades signifi-



5. EVOLUCION DE LA DISTANCIA TOTAL en parsecs entre el Sol y los subgrupos de la asociación Sco-Cen durante los últimos 11 millones de años.

JESUS MAIZ APELLANIZ, NARCISO BENITEZ Y MATILDE CAÑELLES



6. COMPARACION ENTRE LA TASA DE DEPOSICION de ^{60}Fe que se esperaría de las SN Sco-Cen y las mediciones de la corteza oceánica profunda. Las líneas horizontales continuas y los cuadrados rojos representan las mediciones del grupo de Knie y colaboradores, mientras que las zonas sombreadas describen la incertidumbre de sus resultados. Nuestras predicciones están representadas por los círculos negros; las incertidumbres, por las barras de error verticales. Las líneas discontinuas marcan el nivel del fondo residual, no asociado con explosiones recientes, que se espera en la Tierra.

JESUS MAIZ APELLANIZ, NARCISO BENITEZ Y MATILDE CAÑELLES

cativas en el universo reside en las supernovas. La detección de uno de estos isótopos perecederos en nuestro planeta constituye una señal clara de la presencia de material procedente de una supernova *reciente*.

En 1999, Klaus Knie y su grupo midieron el contenido de un raro isótopo radiactivo del hierro, ^{60}Fe, en muestras de corteza oceánica extraídas del fondo del Pacífico y cuya antigüedad se cifraba entre dos y cuatro millones de años. El isótopo goza de las características requeridas para servir de "huella dactilar" de supernovas. Su vida media es corta en términos astronómicos (1,5 millones de años) y, por tanto, la práctica totalidad de los átomos de ^{60}Fe presentes en el universo en este momento se crearon durante los últimos 10 millones de años. Dado que el único mecanismo conocido capaz de generar átomos de ^{60}Fe en cantidades apreciables es una explosión de supernova, Knie y sus colaboradores concluyeron que éste constituía el origen del ^{60}Fe encontrado en sus mediciones. Se originó, supusieron, en una sola explosión, acaecida hace cinco millones de años y a una distancia de 30 parsecs.

El exceso de ^{60}Fe se detecta en dos niveles distintos, pero una supernova aislada depositaría ^{60}Fe en uno solo (*figura 6*). Knie y sus colaboradores postularon la existencia de un "fondo" de hierro radiactivo en el espacio cercano al sistema solar para explicar los resultados del segundo nivel. Esta hipótesis adicional resulta poco satisfactoria, ya que se requieren dos explicaciones distintas para dos sucesos similares. Sin embargo hay que tener en cuenta que la solución más obvia, postular la presencia de dos o más supernovas cercanas a la Tierra en los últimos seis millones de años, parecía ser poco probable (menos de un 1 %) antes de conocerse la información astronómica sobre Sco-Cen antes descrita.

Con estos nuevos datos podemos calcular el número y la distancia típica de las explosiones de supernovas Sco-Cen durante los intervalos de tiempo cubiertos por los niveles geológicos que contienen ^{60}Fe. Sumando la producción de dicho elemento en cada estrella y calculando la cantidad que alcanzaría la superficie de la Tierra, podemos predecir la tasa de deposición de ^{60}Fe en nuestro planeta.

Los cálculos inferidos concuerdan con las mediciones del grupo de Knie en buena lid, no obstante las incertidumbres que aquéllos conllevan. Podemos concluir, por tanto, que la fuente más probable del ^{60}Fe son las supernovas Sco-Cen.

A pesar de todo sería deseable obtener confirmación adicional de estos resultados. Por ejemplo, a través de mediciones en niveles geológicos con una mayor resolución temporal que den lugar a la identificación de explosiones individuales. Otro experimento a realizar es la detección de isótopos similares, cuyo análisis podría potencialmente determinar la masa y la distancia de los progenitores de las supernovas.

En cualquier caso, resulta fascinante que, en un futuro no muy lejano, quizá podamos deducir, apoyados en el estudio de los sedimentos del suelo oceánico, las propiedades de un grupo de estrellas desaparecidas hace millones de años.

Efectos en la biosfera

Las hipótesis esbozadas para explicar sucesos catastróficos en nuestro planeta por medio de causas externas al mismo tienen una larga y no siempre distinguida historia. Los primeros en publicar un artículo proponiendo que la explosión de una supernova cercana podía haber causado alguna de las extinciones masivas de las que nos habla el registro fósil fueron Krasovskii y Shklovskii en 1957. Aplicaron la idea a la extinción de los dinosaurios al final del período Cretácico, envuelta entonces en el misterio. Su hipótesis se continuó explorando a intervalos esporádicos, hasta que en los años ochenta Luis W. Alvarez y su grupo determinaron, con poco margen para la duda, que la fauna

cretácica había sido exterminada por el impacto de un asteroide.

Sin embargo, la sencillez de la idea y su inexorabilidad —es fácil demostrar que varias explosiones de supernova tienen que haber ocurrido muy cerca de la Tierra en el transcurso de la historia del planeta— impidieron que cayera en el olvido. En 1995 Ellis y Schramm realizaron un censo detallado del arsenal destructivo de una supernova. Aunque éste incluye radiación luminosa, radiación ultravioleta, de rayos-X y gamma, e incluso neutrinos, el componente potencialmente más letal para la vida en la Tierra a distancias comparables con las de la asociación Sco-Cen son los rayos cósmicos.

Los iones integrantes de los rayos cósmicos se desplazan a velocidades cercanas a las de la luz. Un fuerte incremento en el flujo de rayos cósmicos en los niveles altos de la atmósfera acelera la producción de óxido nitroso (NO), que actúa como catalizador en la destrucción de moléculas de ozono. La capa de ozono de la atmósfera nos protege de la radiación ultravioleta del Sol; si aquélla desapareciera, la biosfera sufriría graves perjuicios.

¿Es posible, por tanto, que la radiación cósmica producida por las supernovas Sco-Cen haya alcanzado la Tierra en cuantía suficiente para provocar un fenómeno de estas características? Los rayos cósmicos, partículas dotadas de carga, viajan siguiendo una trayectoria con forma de sacacorchos alrededor de las líneas de campo magnético interestelar. La explosión de una supernova desplaza el medio interestelar y, con él, al campo magnético; se engendra una especie de envoltura surcada por las líneas del campo contenidas en el área vaciada por la explosión.

En principio, la envoltura creada podría convertirse en un aislante bastante efectivo para los rayos cósmicos procedentes de una supernova. Sin embargo, en el caso que nos ocupa hubo, en un intervalo de tiempo pequeño, varias explosiones que pudieron expandir esta cáscara hasta englobar a la Tierra, o cuando menos "rasgarla", facilitando el acceso, a nuestro planeta, de los rayos cósmicos de explosiones posteriores.

Resulta, pues, harto difícil determinar con exactitud la cantidad de rayos cósmicos provenientes de Sco-Cen que alcanzaron nuestro planeta. Sí podemos calcular que el máximo flujo de radiación cósmica esperado causaría una disminución en el contenido de ozono de la atmósfera de un 60 % a latitudes altas y de un 20 % en el ecuador. De ello derivaría un incremento en la cantidad de rayos ultravioleta de tipo B (con longitud de onda entre 280 y 320 nanómetros) que llegarían a la superficie terrestre y provocarían, en el peor de los casos, una extinción "menor", de consecuencias leves comparada con catástrofes masivas como la del final del Cretácico.

Ruina del plancton

Una extinción de esas proporciones afectaría en particular a los ecosistemas marinos. En efecto, el incremento de rayos UVB provoca una reducción significativa en la abundancia de fitoplancton, lo que repercute en los organismos que le siguen en la escala trófica. El flagelo sería letal para las especies tropicales: en esas latitudes la radiación solar incide sobre ellas con un ángulo más elevado.

No es tarea fácil descubrir, a través sólo del registro fósil, un suceso de extinción masiva de especies planctónicas. Podría, en cambio, inferirse de la desaparición de moluscos. Ahora bien, atribuir un episodio letal del plancton a una supernova cercana, exige que descartemos otras causas plausibles: erupciones volcánicas, cambios climáticos o impactos de asteroides o cometas. Pero, ¿hay acaso constancia de alguna extinción con estas características en el registro fósil? Sí.

La transición entre el Plioceno y el Pleistoceno, hace unos 2,5 millones de años, se caracterizó por la extinción de bivalvos en la zona tropical y templada. Los paleontólogos han propuesto dos explicaciones para este fenómeno: la aparición del istmo de Panamá y el enfriamiento terrestre debido al inicio del ciclo de glaciaciones. Sin embargo, la rapidez de la extinción no parece compadecerse con un cierre del istmo de Panamá. En otro orden, los análisis finos del proceso de desaparición de especies eximen de responsabilidad al cambio climático.

A la controversia desatada hemos aportado un nuevo objeto de debate: la hipótesis de que la causa de la extinción radica en una de las supernovas Sco-Cen. Nuestra propuesta se ve respaldada, además, con la extinción casi simultanea de poblaciones de coral tropicales, muy vulnerables a la radiación UVB. Y el medio interestelar nos da otra pista: hay indicios de que la onda de choque de una supernova ionizó el medio local hace entre 2 y 3,6 millones de años.

Este artículo ha recorrido un camino de mayor a menor certeza científica. La parte astronómica parece bien establecida, la geológica es sólida pero necesita todavía más experimentos y la paleontológica bordea lo especulativo. Las investigaciones del futuro tendrán la última palabra.

Los autores

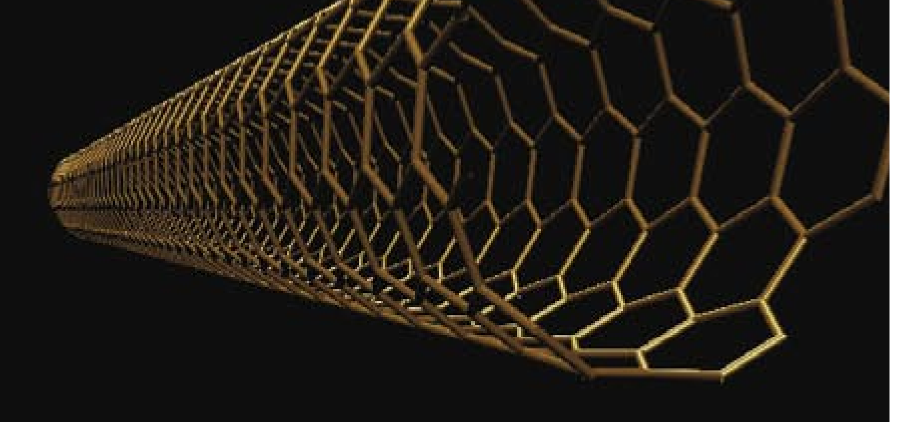
Jesús Maíz Apellániz, astrónomo de la Agencia Espacial Europea en el Instituto Científico del Telescopio Espacial en Baltimore, se halla adscrito al equipo del espectrógrafo STIS. **Narciso Benítez** es investigador asociado en el departamento de física y astronomía de la Universidad Johns Hopkins de Baltimore; pertenece al grupo de la Cámara Avanzada del Telescopio Espacial Hubble. **Matilde Cañelles** trabaja en el Instituto Nacional de la Salud de Bethesda.

Bibliografía complementaria

THE ORIGIN OF THE LOCAL BUBBLE. Jesús Maíz Apellániz en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 560, pág. 83; 2001.

MULTIPLE SUPERNOVA REMNANT MODELS OF THE LOCAL BUBBLE AND THE SOFT X-RAY BACKGROUND. Randall K. Smith y Donald P. Cox en *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 134, pág. 283; 2001.

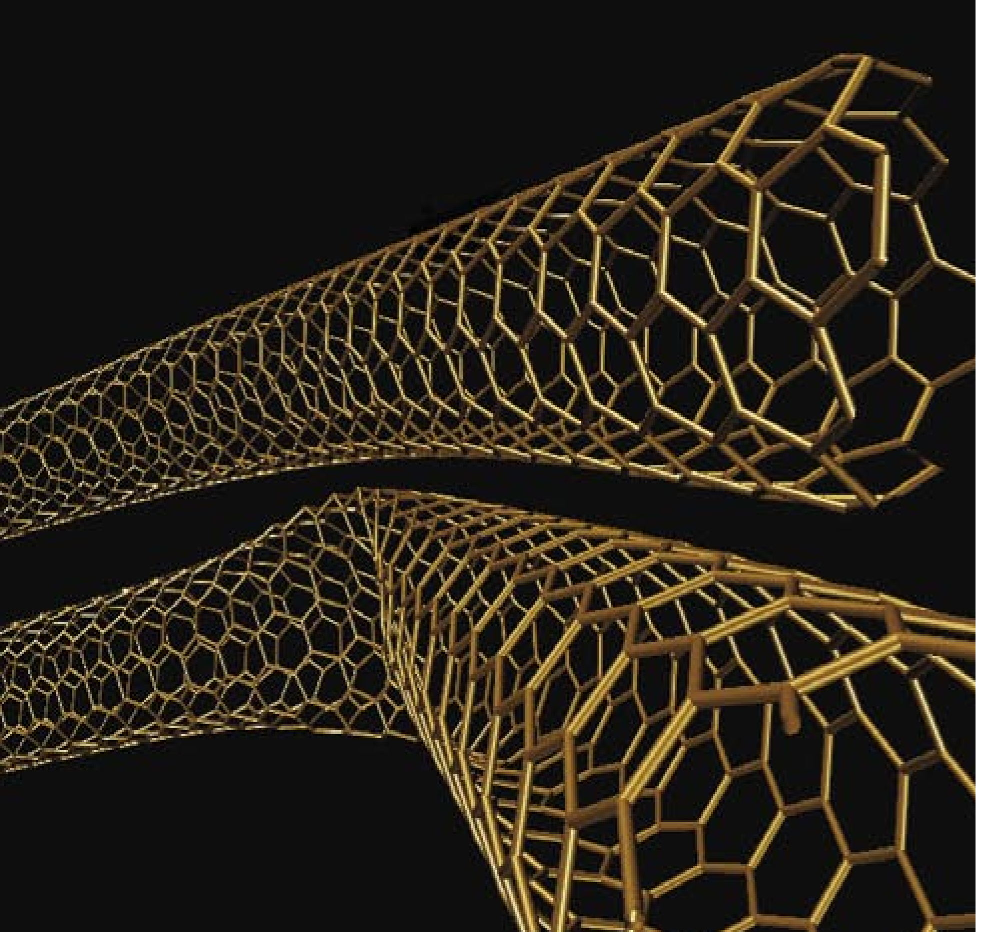
EVIDENCE FOR NEARBY SUPERNOVA EXPLOSIONS. Narciso Benítez, Jesús Maíz Apellániz y Matilde Cañelles en *Physical Review Letters*, vol. 88, pág. 081101; 2002.



Aplicaciones microelectrónicas de los nanotubos

Podrían utilizarse nanotubos de carbono para fabricar chips de memoria de nuevo cuño

Gary Stix



Charles M. Lieber, renombrado experto en nanotecnia, encomendó en 1998 a uno de los doctorandos que trabajaban en su laboratorio de la Universidad de Harvard el diseño de un tipo radicalmente nuevo de memoria informática; el dispositivo debería leer y escribir bits digitales mediante elementos menores de 10 nanómetros. La especialidad de Thomas Rueckes —así se llamaba el becario— no era la computación, sino los nanotubos de carbono, en particular sus propiedades eléctricas y mecánicas.

Los nanotubos, cilindros de poco más de un nanómetro (millonésima de milímetro) de diámetro, presentan una superficie de anillos hexagonales de carbono que recuerda un panal de abejas. Desde su descubrimiento en 1991, la comunidad científica viene encomiando sus excelentes propiedades físicas.

Lieber pretendía que Rueckes lidiara con un nuevo concepto nanotécnico, susceptible de acogerse a la financiación que ofrecía el programa de electrónica molecular de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA). Rueckes empezó por revisar la bibliografía. No encontró nada que pudiera servirle. Cierta tarde salió del laboratorio de química y se encaminó a la cafetería del Centro de Ciencias de Harvard, situada enfrente. Pasó por delante del Harvard Mark 1. (Este gigantesco computador de más de 15 metros de largo —predecesor de los ordenadores modernos— que hoy decora el vestíbulo del centro, había servido a la Armada de los EE.UU. para cálculos de artillería y balística hasta 1959.) En el trayecto de vuelta al laboratorio le vino la inspiración: el principio funcional de Mark 1 (conmutación entre dos posiciones de relés electromecánicos) podía aplicarse a la construcción de una memoria con nanotubos.

Hasta entonces, los proyectos destinados a aplicar la nanotecnia a la microelectrónica concebían los nanotubos como potenciales cables o componentes en nuevos transistores. Inspirado por Mark 1, Rueckes prefirió concentrarse en sus extraordinarias propiedades elásticas

y de resistencia a la tracción. Imaginó que los nanotubos podrían flexionar entre dos posiciones (tensa y relajada) que representarían los estados 0 y 1, en una versión hiperminiaturizada de los relés de aquel computador gigante. Tardó sólo un par días en redactar la propuesta del proyecto de investigación. Lo presentaron a la DARPA. Al día siguiente les concedían la necesaria financiación.

Rueckes siguió perfilando su idea hasta que se doctoró en 2001. A medida que avanzaba en su trabajo, descubría un mayor potencial en los nanotubos. En teoría, reunían las prestaciones necesarias para fabricar una memoria universal que combinaría la velocidad de una memoria de acceso aleatorio estática, el bajo coste de una memoria de acceso aleatorio dinámica (DRAM) y la no volatilidad de una memoria flash, a la vez que consumiría poca energía eléctrica y resistiría estados térmicos y magnéticos potencialmente perjudiciales.

De la teoría a la práctica

Sobre el papel, el diseño no presentaba mayor complejidad. Los nanotubos operarían como conmutadores electromecánicos direccionables individualmente. Dispuestos sobre la superficie de un microchip, almacenarían cientos de gigabits, quizá hasta un terabit, de información. La aplicación de un campo eléctrico sobre un nanotubo lo haría flexionar hacia abajo, hacia una depresión socavada en la superficie del chip, donde contactaría con otro nanotubo (en los diseños actuales, el contacto se produce con un electrodo metálico). Una vez flexionado, el nanotubo conservaría su posición —aun en ausencia de alimentación—, lo que permitiría una operación no volátil. Las fuerzas de Van der Waals (interacciones moleculares débiles) mantendrían el nanotubo en ese estado hasta que la aplicación de un campo de diferente polaridad le hiciera regresar a la posición tensa.

Antes de dejar Harvard, Rueckes ya había recibido la visita de Greg Schmergel, un directivo de una compañía de Internet que buscaba abrir nuevos horizontes. Este empresario procedente del sector de la consultoría de gestión había constatado, mediante su experiencia en el negocio de Internet, cuán inestable y accesible es este nuevo mercado tecnológico. Su empresa, una exitosa sociedad llamada ExpertCentral.com que ofrecía referencias de servicios profesionales, había pasado por tales vicisitudes al apoderarse de ella About.com, que a su vez fue adquirida por Primedia.

La nanotecnia parecía menos propensa a fomentar fiebres del tipo "punto com". Schmergel no sabía gran cosa de esta nueva ciencia, que ni siquiera los expertos eran capa-

1. TRAMAS DE NANOTUBOS de carbono. Constituyen los elementos de conmutación 0 y 1 en el novedoso chip de memoria diseñado por Nantero. Se muestra aquí una sección del dispositivo.

Filamentos de interconexión
Electrodo
Trama de nanotubos de carbono
Transistor
Dióxido de silicio
Capa de siliciuro
Oblea de silicio

JEAN-FRANCOIS POVEDIN

ces de definir de forma contundente, sin recurrir a metáforas de fantasía científica. Lo que sí dominaba era el mundo de los negocios (quizá por herencia de una larga tradición familiar, pues su padre había fundado una de las primeras empresas de biotecnología). Rueckes, en cambio, conocía mejor que nadie el naciente campo de la nanotecnia.

Así pues, en 2001, Schmergel y Rueckes, junto con Brent M. Segal, otro doctor en química de Harvard, fundaron Nantero, cuyo nombre combina los prefijos de lo muy pequeño ("nano", 10^{-9}) y lo muy grande ("tera", 10^{12}). Lieber decidió proseguir en su laboratorio de Harvard con proyectos más avanzados; por ejemplo, unos nanofilamentos inteligentes que se autoensamblarían en componentes microelectrónicos y podrían utilizar señales biológicas, o de otra índole no estándar, para comunicar los distintos componentes entre sí.

El primer objetivo de Nantero era convertir un proyecto doctoral en un dispositivo que pudiera fabricarse en una planta de semiconductores. La compañía se estableció en Woburn, un polígono industrial de Massachusetts donde abundan empresas del sector biotecnológico. Schmergel procuró que los investigadores se concentrasen al máximo en su labor, eliminando cualquier distracción posible. (Nantero ni siquiera hoy figura en la guía telefónica de Woburn.) Visitaron algunos de los fabricantes más importantes de microelectrónica, pero su propuesta no siempre tuvo una buena acogida.

Quitar hierro al asunto

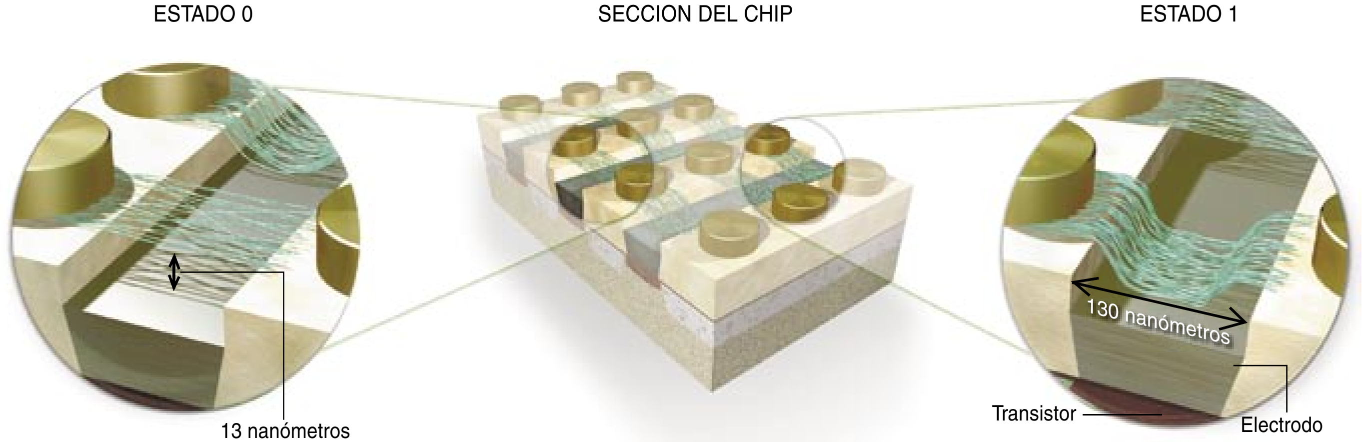
Los nanotubos que uno encuentra en el mercado corresponden a una especie de hollín sumamente tecnificado, que deja un residuo del cinco por ciento de hierro por término medio. La sola mención de este temido contaminante causa pavor a los responsables de las salas blancas donde se fabrican los chips. El grupo de Nantero hubo, pues, de dedicar gran parte de su trabajo inicial al desarrollo de un complejo proceso de filtración para reducir el contenido de hierro al nivel de milmillonésimas.

Superado el problema de las impurezas, debieron enfrentarse a otro gran obstáculo técnico: la adaptación del nanotubo (la malla metálica de carbono enrollada) al proceso estándar de fotolitografía y ataque químico que configura y elimina material para obtener los circuitos eléctricos. Dados los astronómicos costes de las nuevas fábricas de chips (superiores a los 2000 millones de euros), los directores de planta, por demás conservadores, no estaban dispuestos a renovar sus instalaciones para integrar los nanotubos en el proceso normalizado de fabricación CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario).

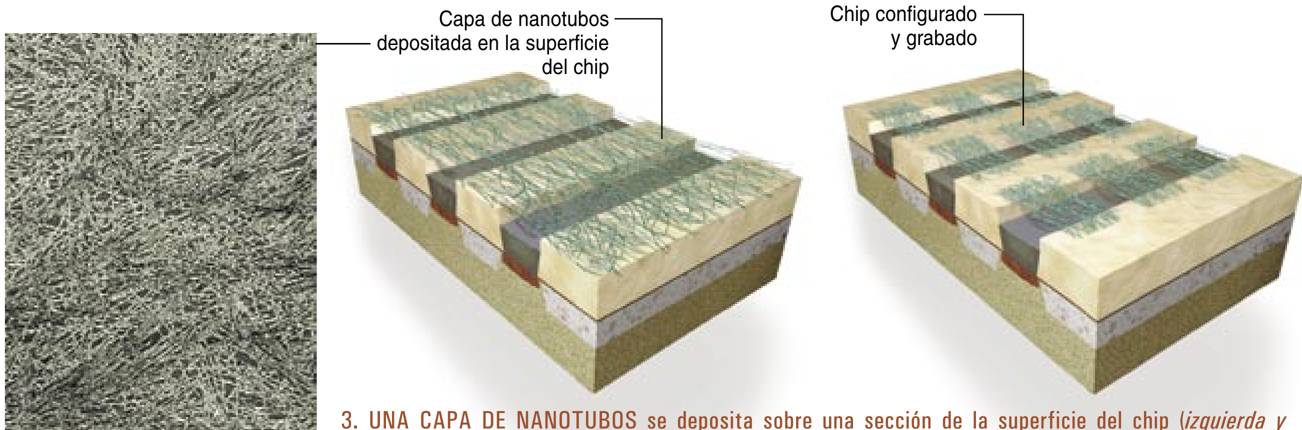
Cuando Nantero empezó, todavía no se sabía cómo formar un nanotubo en la superficie de una oblea de silicio sin interferir en los circuitos eléctricos contiguos. La deposición de nanotubos a partir de la condensación de material evaporado exigía temperaturas tan elevadas que arrasarían los circuitos ya formados. El recubrimiento por centrifugado (hacer girar la oblea como si de un disco fonográfico se tratara para que una disolución de nanotubos se extienda sobre el sustrato) también presentaba inconvenientes; además, el disolvente utilizado (clorobenceno) se consideraba tóxico y se había prohibido en las fábricas de chips.

Nantero ideó y patentó un disolvente adecuado para el recubrimiento por centrifugado. La delgada capa de nanotubos que persiste tras eliminar el disolvente se somete a procesos de litografía y ataque químico que dejan en la superficie de la oblea grupos de nanotubos distribuidos uniformemente. Examinado en detalle, el conglomerado de nanotubos filiformes guarda semejanza con trama textil deshecha, sin urdimbre. La aplicación de un campo eléctrico a uno de los elementos de la trama le hace flexionar hacia abajo hasta que contacta con un electrodo: esta posición equivale al "1" digital. ASML, importante fabricante de instrumental para semiconductores, colaboró con Nantero en el perfeccionamiento de este proceso.

Una vez dominada esta técnica, Nantero inició una nueva ronda de visitas a la industria microelectrónica. En 2003, LSI Logic, destacado fabricante de chips personalizados



2. LA FLEXION Y LA TIRANTEZ corresponden, en una memoria de nanotubos de acceso aleatorio, a los estados 1 y 0 respectivamente. En el estado 0, la trama de nanotubos permanece tensa, suspendida sobre el electrodo (*izquierda*). El estado 1 se alcanza cuando el transistor se activa y el electrodo produce un campo eléctrico que hace que una trama de nanotubos flexione y entre en contacto con un electrodo (*derecha*).



3. UNA CAPA DE NANOTUBOS se deposita sobre una sección de la superficie del chip (*izquierda y centro*) antes de que el material se elimine (*derecha*) mediante procesos estándar de litografía y ataque químico de semiconductores. Para completar la fabricación del chip se requieren ulteriores etapas (*no indicadas aquí*).

para industrias de telecomunicaciones, almacenaje y electrónica de consumo, acordó introducir en su factoría de Gresham (Oregón) el proceso de fabricación de las memorias de nanotubos de acceso aleatorio (NRAM, en siglas inglesas) de Nantero. Para mayor asombro, a los nueve meses ya contaban con un prototipo operativo. Enseguida se puso en marcha un programa de desarrollo. Estimaron la comercialización de las memorias para 2006. El propio director general de la planta, Norm Armour, recuerda su escepticismo inicial y confiesa que todavía hoy se sorprende de los resultados obtenidos. LSI manifiesta interés por continuar esta línea de investigación con miras a sustituir los módulos de memoria de acceso rápido (RAM estáticas) incrustados en los microprocesadores, que cada vez ocupan una porción mayor de la superficie del chip. La memoria de nanotubos ofrecería mayor velocidad y menor tamaño, al propio tiempo que consumiría menos energía.

LSI y Nantero se proponen ahora aumentar el "rendimiento" del proceso, parámetro que expresa la capacidad de producir, de forma repetitiva, millones de memorias de nanotubos. Lograr un rendimiento elevado entraña mayores dificultades técnicas, pues deben atenderse multitud de detalles. Por ejemplo, si la cavidad sobre la que el nanotubo va suspendido no cuenta con bordes bien afilados, las propiedades eléctricas del dispositivo pueden alterarse, variando el voltaje al que se activa y desactiva. Sin embargo, en opinión de Verne Hornback, director del proyecto de colaboración con Nantero en LSI, la mejora del rendimiento no constituye un obstáculo insalvable.

Pese a la curiosidad despertada por las memorias de nanotubos, el escepticismo persiste. Según G. Dan Hutcheson, director de la firma de análisis de mercados VLSI Research en Santa Clara, California, Nantero tuvo una gran idea, pero aún está muy lejos de materializarla en un proceso de fabricación viable. Duda que Nantero logre fabricar, como pretende, un dispositivo a escala creciente capaz de competir en coste y efectividad con una DRAM; además, la ausencia de escalabilidad y repetibilidad limitará sobremanera el rendimiento.

IBM, líder en este campo de investigación, no ha aplicado los nanotubos al diseño de nuevas memorias, sino al de componentes que puedan transportar los electrones de uno a otro lado del transistor. Phaedon Avouris, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, señala que lo que escasea no son los tipos de memoria, sino los dispositivos lógicos; ahí es donde los nanotubos ofrecen propiedades inigualables.

Con todo, Nantero cree que los avances logrados con LSI desmentirán los malos augurios. Por ejemplo, utilizar como elementos de conmutación tramas de nanotubos en vez de nanotubos individuales —el enfoque del primer diseño adoptado en Harvard— reduce los problemas asociados a las posibles variaciones de tamaño de los tubos. Además, la compañía ha conseguido ya otro socio, BAE Systems, para trabajar en aplicaciones aeroespaciales y militares de las NRAM, memorias resistentes a las radiaciones.

En cualquier caso, aunque los chips no alcancen a cumplir todas las expectativas, Nantero —con 60 solicitudes de patentes registradas y 10 de ellas concedidas— guardará en su poder un valioso bagaje nanotécnico que podrá ofrecer a cuantos deseen aplicar los nanotubos a la fabricación de chips.

La mera introducción de nanotubos en una factoría ya se puede considerar un verdadero hito. Hornback, director de LSI, subraya que el mayor triunfo se ha logrado al incorporar el proceso a una cadena CMOS estándar. La fabricación de teléfonos celulares con chips de nanotubos constituiría una agradable recompensa para las legiones de investigadores que han dedicado varios años de su carrera a escudriñar estas motas imperceptibles. Hasta la fecha, los únicos productos que incorporan este nanomaterial, más resistente que el acero y tan duro como el diamante, sólo han aparecido en notas de prensa de universidades e industrias.

NANOTERO (*izquierda*); JEAN-FRANCOIS POVEDIN (*centro y derecha*)

Bibliografía complementaria

NANOCIRCUITOS. Charles M. Lieber en *Investigación y Ciencia*, n.º 302, págs. 54-60; noviembre, 2001.

SUPERTUBES. Phaedon Avouris en *IEEE Spectrum*, vol. 41, n.º 8, págs. 40-45; agosto, 2004.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Ondas y Moho

Para Descartes, la Tierra es un antiguo sol donde, en torno a un núcleo de "materia solar", se apilan diversas capas de tierra, agua y aire. Pese a lo equivocado de esa descripción, Descartes tiene razón en la idea básica. Hoy, en el seno de la Tierra distinguimos el nucléolo, el núcleo, el manto y la corteza. Esas capas las han identificado los geofísicos gracias a las ondas sísmicas, deformaciones periódicas que se propagan por el interior de nuestro planeta y por su superficie. Esas ondas se estudian para conocer las propiedades de la Tierra y de sus temblores.

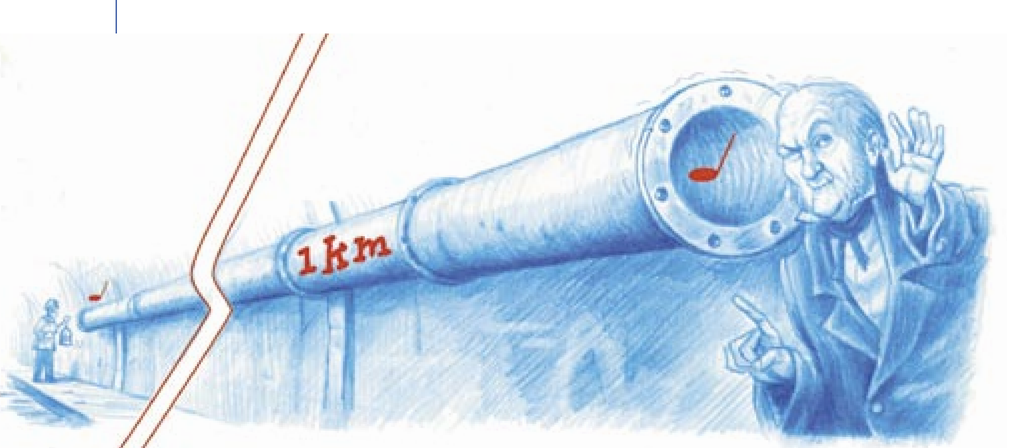
Ondas volumétricas

Al igual que los fluidos, los sólidos transmiten el sonido. Si aplicamos el oído a una viga metálica, percibimos el golpeteo de unos dedos en el otro extremo. ¿Qué ocurre? Los pequeños impactos comprimen levemente la superficie del metal, que se distiende y comprime la capa contigua, que se distiende, y así sucesivamente. Ese mecanismo prosigue hasta rebasar el otro extremo, y luego por el aire hasta el tímpano. El sonido es una onda de compresión. Cuanto más rígida es la materia que atraviesa, más rápido se propaga; en cambio, cuanto más densa sea, y por tanto cuanto mayor sea su inercia, tanto menor será la velocidad del sonido. Comparados con los líquidos, los sólidos son a la vez más densos y más rígidos. Esta última característica prevalece y confiere al sonido una velocidad superior en ellos. Frente a los 1500 metros por segundo en el agua, la velocidad del sonido alcanza 3650 metros por segundo en el ladrillo y 6000 metros por segundo en el granito.

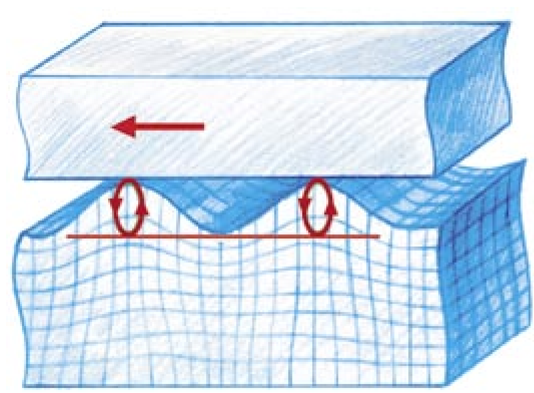
Además de ondas de compresión, como el sonido, los sólidos transmiten "ondas de cizalladura". Los cizallamientos están formados por dos fuerzas de sentido opuesto y perpendiculares al eje que une sus puntos de aplicación. Les es característico que deformen la materia sin cambiar su volumen. Los líquidos no los resisten: si "cortamos" agua con unas tijeras, fluye. En cambio, los sólidos oponen resistencia a las cizalladuras: para cortar una chapa con una cizalla, se consume energía. La elasticidad de los sólidos y su resistencia al cizallamiento explican por qué en ellos las deformaciones por cizalladura se propagan poco a poco. Mientras que las oscilaciones de compresión de la materia son paralelas a la dirección de propagación, las de cizallamiento son perpendiculares.

¿Cómo comparar la velocidad de las ondas de cizalladura con la del sonido? Un cuerpo, cualquiera que sea, resiste más una compresión de su volumen que una acción que, como una cizalladura, deja globalmente inalterado el espacio que ocupa. Así, puesto que un sólido opone menos resistencia a un cizallamiento que a la compresión, en los sólidos las ondas de cizalladura son más lentas que las de compresión. En el terreno, una onda de cizalladura se propaga a tres kilómetros por segundo, mientras que la velocidad del sonido es de seis kilómetros por segundo.

Para estudiar la estructura de la Tierra, los geofísicos se valen de esos dos tipos de ondas. Las brutales deformaciones que sufre el terreno durante un seísmo producen ondas a la vez de compresión y de cizalladura. Al ser aquéllas unas dos veces más rápidas que éstas, toman la delantera durante la pro-

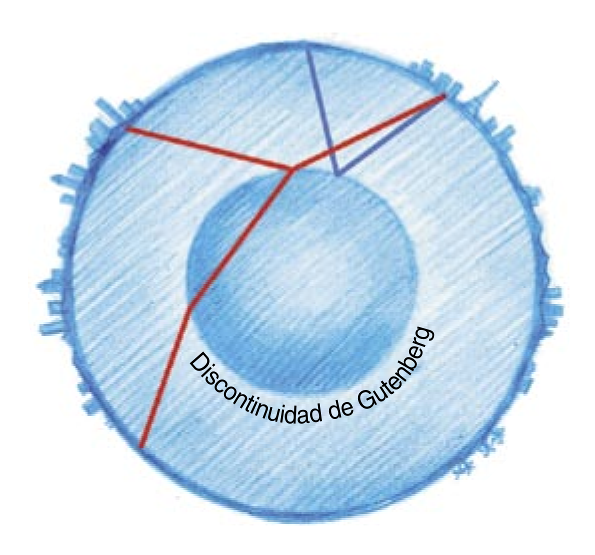


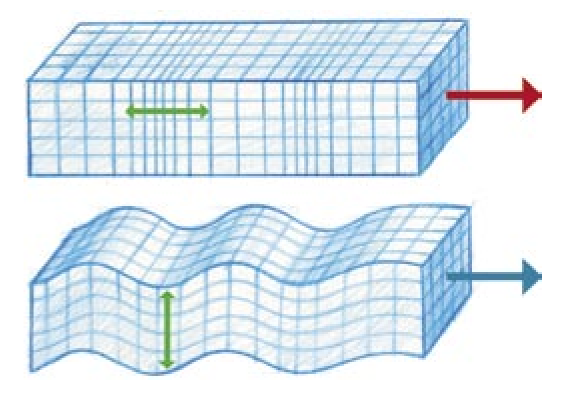
1. El sonido se propaga en el tubo (sólido) a una velocidad más de 15 veces superior que en su interior (aire). A principos del siglo XIX, el físico Jean-Baptiste Biot lo demostró en las primeras alcantarillas de París.



2. En este motor, la parte móvil se desplaza sobre las crestas de ondas de Rayleigh.

BRUNO VACARO





3. Dos tipos de ondas sísmicas se propagan en el seno de la Tierra: ondas de compresión (*en rojo*) y ondas de cizalladura (*en azul*). Mientras que las primeras se propagan en el seno del núcleo líquido de nuestro planeta, las segundas se reflejan en su superficie.

pagación. El tiempo transcurrido entre la recepción de las ondas es proporcional a la distancia que hayan recorrido. Un único sismógrafo que mida esa demora bastaría para determinar a qué distancia se halla el epicentro de un seísmo. En cambio, para "triangular" la posición y la profundidad del epicentro hacen falta al menos tres sismógrafos situados en puntos diferentes del globo.

Cuando conocen el foco de una onda sísmica, los geofísicos extraen una copiosa información de la manera en que se propaga por dentro de la Tierra. Como todas las ondas, una onda sísmica en parte se refleja y en parte se transmite cuando encuentra una superficie de separación entre dos medios de naturaleza o de densidad diferentes. Hacia 1914, el croata Andrija Mohorovicic comprendió qué debían deducirse de la existencia ecos de retorno cada vez que una onda sísmica se propaga hacia el interior de la Tierra: la presencia, a una profundidad de entre 70 y 150 kilómetros, de una importante diferencia de densidad. Conocida hoy con el nombre de "Moho", esa discontinuidad marca la separación entre la corteza terrestre y el manto. Del mismo modo, gracias a una reflexión de las ondas más profunda, se descubrió la discontinuidad de Gutenberg, que se halla a unos 3000 kilómetros de profundidad y separa el manto del núcleo.

Hecho asombroso, los geofísicos han constatado que el núcleo transmite las ondas de compresión, pero no las de cizalladura. ¡O sea, que el núcleo es líquido! Sin embargo, cuando profundizaron en su análisis, se dieron cuenta de que hay una esfera sólida —el nucléolo— en el centro del núcleo. Su radio es de unos 1500 kilómetros.

Ondas de superficie

Los seísmos producen un tercer tipo de ondas mecánicas que se propagan por la superficie: las ondas de Rayleigh. Se asemejan al oleaje: combinan ondas de compresión (movimientos horizontales) y ondas de cizalladura (movimientos verticales). Así, un objeto colocado en el suelo efectúa un movimiento elíptico al paso de una onda de Rayleigh. En los valles de la onda, el objeto se desplaza en el sentido de su movimiento; luego, en las crestas, en el sentido contrario. Como las ondas de Rayleigh se propagan por la superficie, la materia que comprimen puede escapar hacia arriba. En los lugares donde comprimen el terreno, el suelo se levanta; en los lugares donde tiran de él, se hunde. Esa libertad de movimiento resulta de la presencia de la atmósfera, y no de la materia sólida por encima del suelo. Reduce la rigidez del terreno y, por ello, las ondas de Rayleigh son aún más lentas que las ondas de cizalladura: no pasan de los 2,7 kilómetros por segundo.

Tal y como ocurre con el oleaje, una onda de Rayleigh se queda en la superficie, a la que deforma en una profundidad del orden de su longitud de onda. Hay que tener en cuenta que su energía se dispersa en dos direcciones del espacio y no en las tres; por eso, se atenúa con menor rapidez que las otras ondas sísmicas. La onda de Rayleigh emitida por un temblor de tierra sigue siendo detectable después de que haya dado tres vueltas a la Tierra.

Aunque las ondas de superficie nada informen acerca de la estructura interna de la Tierra, los geofísicos las han estudiado con detalle, puesto que representan el riesgo mayor de los terremotos. Los conocimientos acumulados se han revelado preciosos... en la industria. Así, la peculiaridad del movimiento de una superficie en presencia de una onda de Rayleigh ha dado a los ingenieros japoneses la idea de un nuevo tipo de motor. Rápido y preciso, bien adaptado a los pequeños movimientos, se emplea sobre todo en los objetivos de las cámaras fotográficas. La pieza que ha de moverse está depositada sobre una cerámica piezoeléctrica, material que se deforma bajo el efecto de una tensión eléctrica. Cuando una cerámica fija es sometida a una frecuencia eléctrica superior a 20 kilohertz, en ella se propagan ondas de Rayleigh, que hacen ondular la superficie. Elevada por las "crestas de las olas", la pieza móvil se desplaza con ellas, mientras que la materia redondeada de la cresta "rueda" hacia atrás. Al cesar la corriente, la cerámica se aplana al instante y el rozamiento entre las piezas paraliza el movimiento. ¡Lástima que las ondas de Rayleigh destruyan nuestras casas, en vez de simplemente desplazarlas por la superficie de la Tierra!

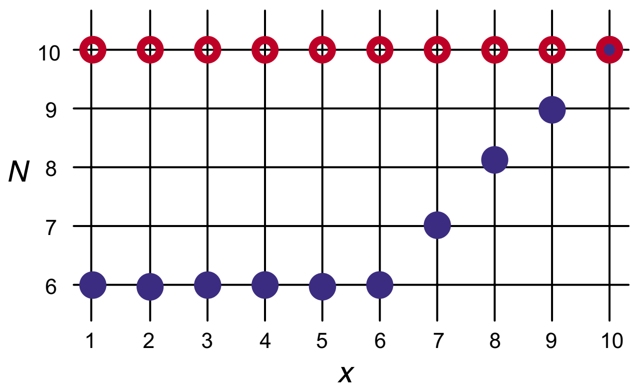
BRUNO VACARO

Juan M.R. Parrondo

Fósiles y lotería

Normalmente jugamos a la lotería comprando un décimo, es decir, tratando de adivinar qué número saldrá de un bombo que contiene un cierto número de bolas. Los paleontólogos se enfrentan en ocasiones a un juego casi opuesto: conocen el número que ha salido de un bombo y tienen que averiguar cuántas bolas hay en él.

Este problema, cuyo planteamiento y parte de su análisis me han sido sugeridos por Antonio Fernández, profesor de matemáticas del Instituto Salvador Allende de Fuenlabrada, parece un tanto trivial. Si, por ejemplo, nos dicen que la bola extraída de un bombo es la 8, el número total de bolas N puede ser igual o mayor que 8. En principio da la impresión de que no importa por qué número apostemos, con tal de que sea mayor o igual que 8. Sin embargo, esto no es siempre cierto.



1. Diferentes estrategias para adivinar el número N de bolas de un bombo del que se ha extraído la bola x.

Veamos un caso muy sencillo en el que supondremos que el número total de bolas N se elige al azar entre 6 y 10. Es decir, sólo puede ser 6, 7, 8, 9 o 10, y toma cada uno de estos valores con probabilidad 1/5. En el bombo se introducen N bolas numeradas de 1 a N y se extrae una de ellas. La probabilidad de que el número de bolas sea N y la bola extraída sea x es entonces:

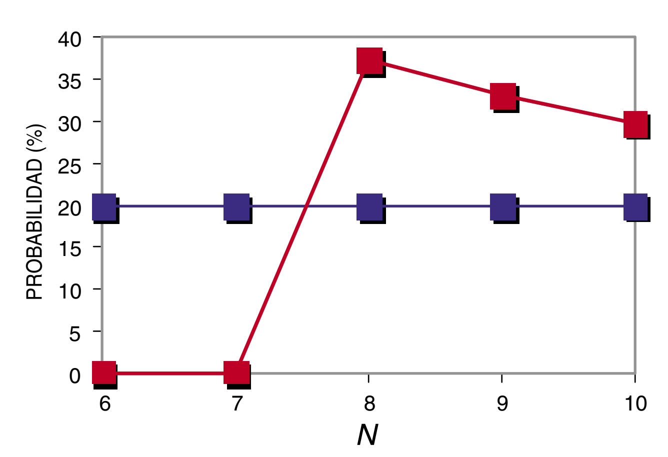
$$P(N,x) = \frac{1}{5} \times \frac{1}{N}$$

siempre que $x \leq N$ y $6 \leq N \leq 10$. Analizaremos primero algunas estrategias sencillas para comprobar que no todas tienen la misma probabilidad de ganar. La primera es apostar siempre por $N = 10$, independientemente del número extraído. La probabilidad de ganar es entonces $P_{ganar} = 1/5 = 20\,\%$, puesto que no utilizamos la información de la bola extraída x y N será igual a 10 una de cada cinco veces. Esta estrategia se puede representar en una cuadrícula en donde están todos los posibles pares (x,N), como en la figura 1. Los círculos rojos representan la estrategia de apostar siempre por $N = 10$, independientemente del valor de x. La probabilidad de ganar, $P_{ganar} = 20\,\%$, puede también obtenerse sumando lo que vale $P(N,x)$ en los 10 círculos rojos de la figura 1.

Pero es posible imaginar otras estrategias. Por ejemplo, en la representada por los círculos azules de la figura 1, se apuesta por el N más pequeño compatible con la bola extraída x, es decir, $N = 6$ si $x = 1, 2, ..., 6$, y $N = x$ si $x = 7, 8, 9$ o 10. La probabilidad de ganar con esta estrategia se obtiene sumando las 10 probabilidades $P(N,x)$ de los puntos azules de la figura, y resulta ser: $P_{ganar} \approx 29{,}6\,\%$. Esta estrategia es por tanto más eficaz que la anterior. No es difícil demostrar que es la estrategia óptima: Los puntos azules no se pueden mover hacia abajo, puesto que entonces apostaríamos por un número N de bolas en el bombo inferior al número extraído x, lo cual es absurdo. Pero si movemos cualquiera de los puntos hacia arriba, aumenta N y disminuye la probabilidad $P(N,x)$. Por tanto, cualquier desviación de la estrategia de los puntos azules tiene como consecuencia una disminución en la probabilidad de ganar.

Es curioso que la mejor estrategia consista en decir que el bombo tiene el menor número de bolas compatible con el número extraído x. Mucha gente piensa que la bola extraída x es una estimación razonable de la *mitad* del tamaño del bombo y que se debería apostar por algún número N cercano a $2x$ y compatible con las reglas del juego. Sin embargo, acabamos de demostrar que esta idea no es correcta.

Un método muy general de resolver problemas como éste es la llamada *inferencia bayesiana*. Este método



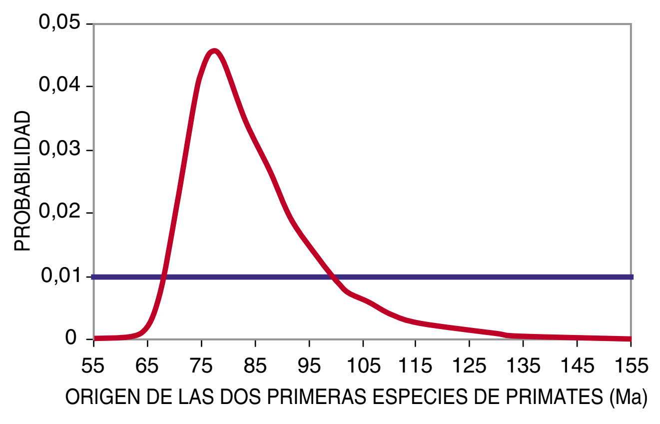
2. Probabilidad *a priori* (*en azul*) y *a posteriori* (*en rojo*) en el problema del bombo, supuesto que se ha extraído la bola $x = 8$.

parte de una cierta distribución de probabilidad para una cantidad desconocida, que se llama *probabilidad a priori.* En nuestro caso la distribución de probabilidad *a priori* de N es $P(N) = 1/5$ para $N = 6, 7, 8, 9$ o 10. Cuando se nos muestra el valor de x, la probabilidad de N ya no es la misma. ¿Cuál es esta nueva probabilidad o probabilidad *a posteriori* $P(N|x)$? Su cálculo no es muy difícil. El punto de partida es la probabilidad $P(N,x)$ de que el número total de bolas sea N y que el número extraído sea x. Si, por ejemplo, el número extraído es $x = 8$, N sólo puede tomar los valores 8, 9 y 10 y la probabilidad con la que los toma, es decir, la probabilidad *a posteriori*, tiene que ser proporcional a $P(N,8)$. La probabilidad *a posteriori* para $N = 8$, 9 y 10, supuesto que el número extraído es $x = 8$, es entonces:

$$P(N|x = 8) = \frac{P(N,8)}{P(8,8) + P(9,8) + P(10,8)}$$

En la figura 2 podemos comparar las probabilidades *a priori* y *a posteriori* para el caso $x = 8$. Como vemos, la probabilidad *a posteriori* está más concentrada y alcanza su máximo para $N = 8$, que es precisamente la estrategia de los puntos azules de la figura 1.

Pero, ¿qué tiene que ver este problema con la paleontología? La respuesta guarda relación con una cuestión que me ha sugerido Marián Beltrán, profesora de antropología de la Universidad de Castilla La Mancha. Supongamos que encontramos el fósil de una especie. Si después de datar el fósil, se encuentra que el animal del que proviene vivió hace 8 millones de años, ¿cuándo se originó dicha especie? Si la especie se originó hace N millones de años y si datamos con una precisión de un millón de años, encontrar el fósil es exactamente lo mismo que extraer un número de un bombo con N bolas. En nuestro ejemplo, la bola extraída es $x = 8$ millones de años. Como hemos visto, y aunque sea en cierto modo contrario a la intuición, lo más probable es que la especie se haya originado hace precisamente 8 millones de años. Aunque este "más probable" hay que tomarlo con bastante precaución: como se ve en la figura 2, las probabilidades *a posteriori* para el número N decrecen muy lentamente.



3. Probabilidad *a priori* (*en azul*) y *a posteriori* (*en rojo*) del momento en el que se originaron las primeras especies de primates.

Esta es por supuesto una simplificación muy drástica de los problemas a los que se enfrenta la paleontología, ya que normalmente se dispone de varios fósiles de la misma especie y de otros datos, como el parentesco con otras especies conocidas. Pero la idea básica es similar a la inferencia bayesiana en el problema del bombo. En abril de 2002, el matemático de la Universidad del Sur de California Simón Tavaré y sus colaboradores publicaron en *Nature* un estudio de los fósiles de las distintas especies de primates utilizando técnicas similares a la inferencia bayesiana. La siguiente tabla muestra el número de especies de primates de las que se han encontrado fósiles en función de su antigüedad (en millones de años):

EPOCAS	TIEMPO (en Ma)	NUMERO DE ESPECIES
PLEISTOCENO	0,15	19
	0,9	28
	1,8	22
PLIOCENO	3,6	47
	5,3	11
MIOCENO	11,2	38
	16,4	46
	23,8	36
OLIGOCENO	28,5	4
	33,7	20
EOCENO	37	32
	49	103
	54,8	68

Como se ve en la tabla, el fósil más antiguo encontrado tiene casi 55 millones de años de antigüedad. Sin embargo, estudios de biología molecular indican que los primates provienen de dos especies que se originaron hace unos 90 millones de años. En la figura 3 (tomada de un artículo de Plagnol y Tavaré), podemos ver la probabilidad *a priori* y *a posteriori* del tiempo en el que aparecieron las primeras especies de primates. La probabilidad *a priori* es simplemente una probabilidad uniforme entre 55 y 155 millones de años (en este *a priori* ya se ha tenido en cuenta que el fósil más antiguo tiene 54,8 millones de años de antigüedad), mientras que la probabilidad *a posteriori*, calculada utilizando todos los datos de la tabla y alguna suposición adicional, alcanza su máximo en torno a los 80 millones de años y da una alta probabilidad a una antigüedad de 90 millones de años. Por lo tanto, el estudio de Tavaré serviría para reconciliar el registro fósil con los estudios de biología molecular y avanzar un paso más en el conocimiento de nuestro propio pasado.

Mark Fischetti

PROTECCION SISMICA

Amortiguación

Año tras año, los terremotos acaban con la vida de miles de personas y causan daños por valor de miles de millones de euros. El hormigón armado y las cerchas especiales han mejorado la tenacidad de los grandes edificios; los mecanismos encargados de reducir las sacudidas sísmicas, en cambio, todavía están poco extendidos.

Los códigos de edificación exigen que las estructuras ofrezcan “seguridad personal”; es decir, que la construcción no se derrumbe, para que los ocupantes puedan ser evacuados. ¿Qué impide la ejecución de tal medida? Su elevadísimo coste. André Filiatrault, subdirector del Centro Multidisciplinar para la Investigación en Ingeniería Sísmica de la Universidad Estatal de Nueva York en Búfalo, explica que las dificultades no son técnicas sino económicas: las técnicas al uso permitirían proyectar un edificio que sobreviviera sin daños al más intenso de los terremotos, pero resultaría tan caro que nadie lo construiría. El sector inmobiliario está empezando a considerar el aumento de coste que supondría minimizar los daños a la estructura, a los sistemas mecánicos y al contenido, y, en última instancia, posibilitar una reocupación inmediata. En un hospital, por ejemplo, la estructura supone sólo el diez por ciento del coste total; el 90 por ciento restante corresponde a los materiales y equipos de construcción, pero, al no ser prescindibles, incluir la seguridad personal siempre encarece la obra.

Según explica James Malley, director de Degenkolb Ingeniería (San Francisco), las técnicas más en boga tratan de absorber gran parte de la energía sísmica para que ello no deba hacerlo el edificio. Se consigue interponiendo dispositivos que soportan grandes cargas entre el edificio y sus cimientos: aislantes de basamento que operan como colchones elásticos, fluidos viscosos que absorben las sacudidas o cojinetes de deslizamiento que permiten que el edificio oscile sin romperse. La mayor parte de esos dispositivos son adaptaciones de los equipos militares que se usan para robustecer silos de misiles, cubiertas de barcos y submarinos ante bombas y misiles; los contratistas los están extendiendo a la obra civil, señala Douglas P. Taylor, consejero delegado de Taylor Devices.

Nuevas técnicas están ya en fase de pruebas: actuadores que tiran de vigas pretensoras para contrarrestar los movimientos sísmicos y fluidos electrorreológicos que, ocluidos en los cimientos, se tornan de líquido en gel para filtrar las ondas de choque. Mientras tanto, siguen proliferando la construcción de nuevos edificios y el reacondicionamiento de los ya existentes. Ni siquiera en California, la mayoría de los edificios todavía no están equipados.

1. AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO que operan de forma similar a los del automóvil: neutralizan los movimientos del suelo y minimizan los desplazamientos relativos de los pavimentos para que éstos no se hagan añicos. Un émbolo con taladros se mueve en el seno de aceite de silicona, disipando así en forma de calor la energía mecánica del seísmo.

KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

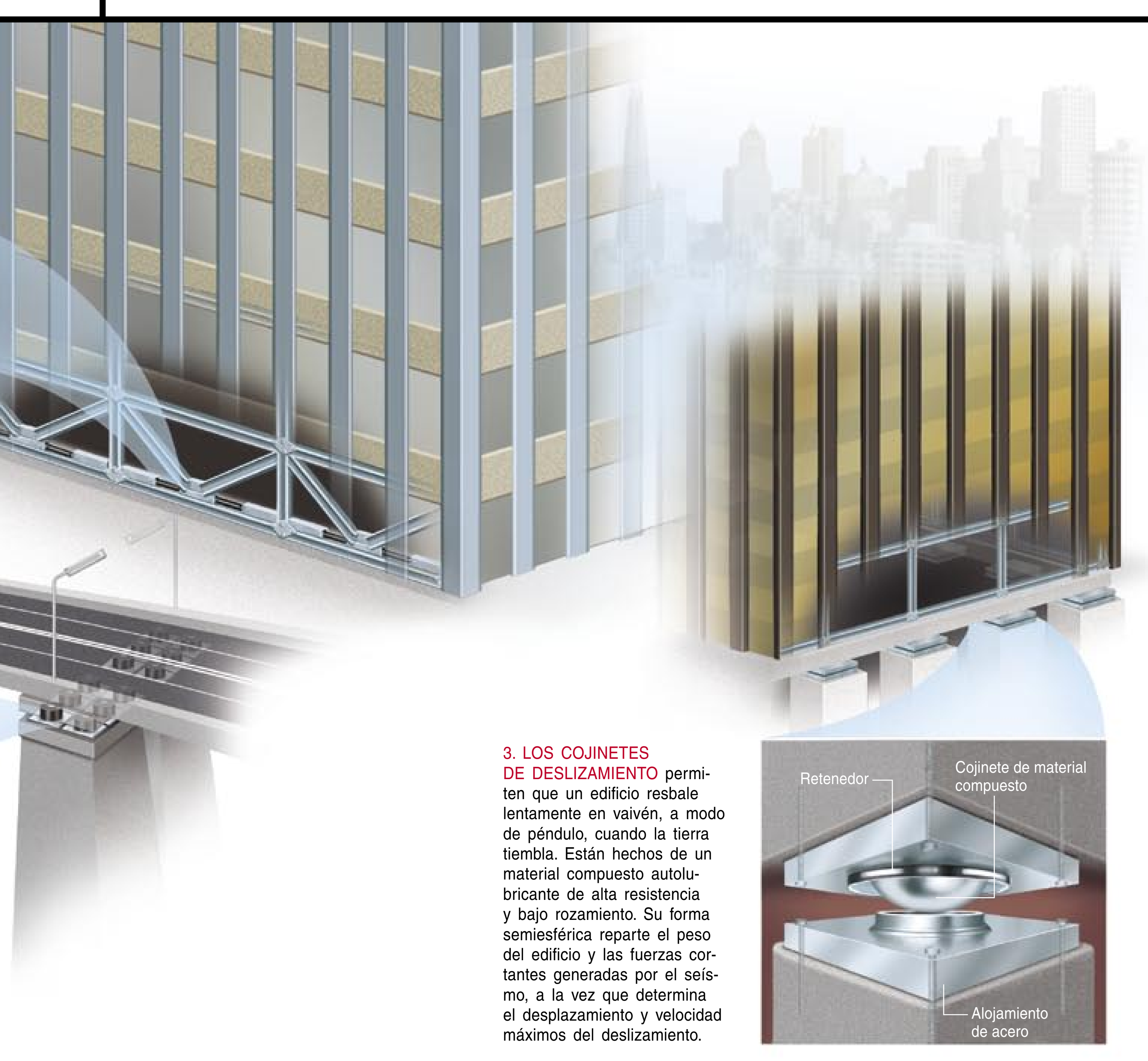
2. AISLADORES DE BASAMENTO bajo pilares de puentes, calzadas o columnas de edificios, aminoran los esfuerzos cortantes generados por los terremotos y, con ello, los daños. Capas de caucho absorben los movimientos laterales; se deforman horizontalmente y se recuperan devolviendo la estructura a su posición original. Plaquetas de acero adheridas al caucho confieren la rigidez necesaria para impedir los movimientos verticales. El núcleo de plomo evita que la estructura se mueva con el viento.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **TERREMOTOS COMPARTIDOS:** En 1999, la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) estadounidense puso en marcha la Red de Simulación de Ingeniería Sísmica para investigar cuál era la mejor forma de proteger los edificios contra los terremotos. Durante 15 años, la NSF gastará más de cien millones de dólares en al menos 20 centros universitarios de investigación. Cada uno de éstos, en los que se están construyendo mesas vibrantes y tanques de olas gigantescos, realizará experimentos en las instalaciones de los demás a través de redes de alta velocidad.

➤ **DESASTRES NECESARIOS:** Dos desastres naturales han acelerado, de forma rápida y repentina, los trabajos sobre aislamiento estructural: el terremoto de Northbridge (California), en enero de 1994, que se cobró 60 vidas y causó daños por valor de 20.000 millones de dólares, y el seísmo de Kobe (Japón), en enero de 1995, que mató a más de 5000 personas y causó daños en más de 50.000 edificios. La historia se repite: el seísmo del valle californiano de San Fernando, en 1971, propició la aprobación de un código que exigía el uso de hormigón armado en la construcción de edificios.

➤ **MALOS VIENTOS:** Pese a su aparente fragilidad, los rascacielos soportan fuertes vientos. Sin embargo, puede que su oscilación maree a los ocupantes. Este movimiento puede evitarse instalando en la azotea grandes depósitos de agua que, al agitarse, contrarresten el vaivén del edificio; además, pueden utilizarse para sofocar incendios. Otra posibilidad consiste en apoyar el techo sobre cojinetes de deslizamiento que permitan el balanceo (*ilustración*); se aísla así el núcleo interno, aliviando los esfuerzos mecánicos que las columnas verticales sufren durante un seísmo.



3. LOS COJINETES DE DESLIZAMIENTO permiten que un edificio resbale lentamente en vaivén, a modo de péndulo, cuando la tierra tiembla. Están hechos de un material compuesto autolubricante de alta resistencia y bajo rozamiento. Su forma semiesférica reparte el peso del edificio y las fuerzas cortantes generadas por el seísmo, a la vez que determina el desplazamiento y velocidad máximos del deslizamiento.

LIBROS

Ilustrados

Segundo escalón

THE ENLIGHTENMENT WORLD. Dirigido por Martin Fitzpatrick, Peter Jones, Christa Knellwolf y Ian McCalman. Routledge; Londres, 2004.

ANATOMIE. SEKTIONEN EINER MEDIZINISCHEN WISSENSCHAFT IM 18.JAHRHUNDERT. Coordinado por Jürgen Helm y Karin Stukenbrock. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2003. ADAM CHRISTIAN THEBESIUS (1686-1732) UND DIE ENTDECKUNG DER VASA CORDIS MINIMA, por Andreas Mettenleiter. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2001.

D'HOLBACH E LE RIVOLUZIONI DEL GLOBO, por Giovanni Cristani. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 2003.

FRENCH BOTANY IN THE ENLIGHTENMENT, por Roger L. Williams. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2003. ANTONIO JOSÉ CAVANILLES (1745-1804). SEGUNDO CENTENARIO DE LA MUERTE DE UN GRAN BOTÁNICO. AA.VV. Real Sociedad Económica de Amigos del País; Valencia, 2004.

Tiene España una deuda pendiente con el profesor López Piñero. Por lo que al crítico le alcanza, no hay en el panorama de la historia de la ciencia otro de quien, en Europa o América, él sea segundo. Considérese el hipocratismo o su extensión galenista, bucéese en el saber terapéutico medieval, abórdese entero el Renacimiento —químico, naturalista o navegante—, repárese en el movimiento novator, en la ilustración e interpretación anatómicas, en la medicina de laboratorio, la escuela de Viena, la neurología europea o nuestro Cajal. En trazo sobrio y cabal compendia y decanta lo que en la mayoría suele comportar páginas farragosas de erudición acrítica. Hay en ese primor de lo sencillo muchas horas de estudio directo de las fuentes, sin intermedio de traducciones ajenas o vademécums de urgencia, y una inteligencia profunda que llega a la raíz del concepto, del método o de la doctrina. A muy pocos historiadores de la ciencia les ha sido concedido el don de saber percibir las líneas generales de una época de entre el ruido de autores y escritos. A propósito de la Ilustración, López Piñero nos ofrece, en compendios generales o temáticos, así como en su *Diccionario*, una jerarquización rigurosa de aportaciones. Distingue, pues, los cambios de giro fundamentales de las aportaciones modestas de la masa crítica de segundo nivel. También aquí, en su estudio sobre Cavanilles.

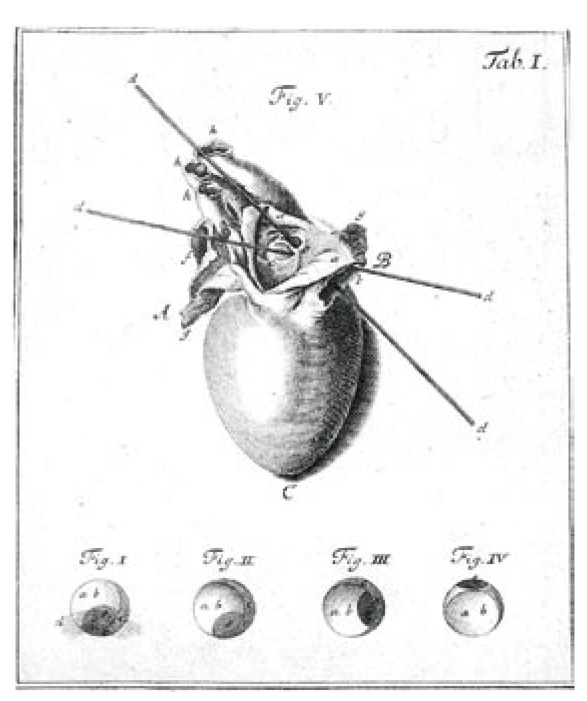
Se asocia la Ilustración (*The Enlightenment World*) a un movimiento que aunó a filósofos, ensayistas, científicos y políticos en torno a una gavilla de nociones básicas sobre el mundo, la sociedad, el hombre y la mente. Pero no se trató de un todo monolítico. Hija y culminación de la Revolución Científica, la Ilustración no se mueve de los raíles sobre los que el mecanicismo y el racionalismo han encauzado el saber occidental. Recoge, pues, el fruto de un heliocentrismo asentado, de un universo abierto a espacios infinitos, en el que se iban sucediendo los descubrimientos de nuevas estrellas y satélites, e incluso de la naturaleza magnética de la Tierra. Los procesos asociados a la vida se vienen explicando a través de reacciones químicas o fluidos físicos. Se trabajaba sobre la seguridad de que las operaciones de la naturaleza seguían leyes fijas y universales, canónicas. Por su parte, la filosofía mecanicista se erigió, primero a extramuros de la academia, contra el aristotelismo imperante en las universidades.

El conocimiento científico adquiere ya un prestigio social, que durará hasta nuestros días. Existía plena conciencia de que se pertenecía a un mundo dominado por el hombre; cuando menos, a su alcance y medida. Fuera ello con la constitución de compañías ultramarinas o con la disección íntima del cuerpo humano. Un optimismo que quizá pareciera hoy desmesurado. A mediados de la centuria no se conocían otras formas de energía que la luz y el calor, se ignoraba la composición del aire y el agua; la naturaleza del fuego, la edad de la Tierra, el tamaño del universo, la evolución de las estrellas, los principios de la vida o la herencia genética.



1. Abraham Vater (1684-1751).

Pero si algo no les faltó a los anatomistas del siglo XVIII fue autocomplacencia, saberse dueños del arte (*Adam Christian Thebesius (1686-1732) und die Entdeckung der Vasa Cordis Minima* y *Anatomie. Sektionen einer medizinischen Wissenschaft im 18.Jahrhundert*). Las innovaciones técnicas no sólo sacaron a la luz órganos y procesos, sino que condujeron también a nuevos conceptos. En las figuras de Abraham Vater (1684-1751) y de Adam Christian Thebesius (1686-1732) hallamos representada la *aurea mediocritas*, la masa crítica de una disciplina que se va independizando y que asiste a un despegue espectacular entre Frederik Ruysch (1638-1731) y Albrecht von Haller (1708-1777).



2. Ilustración del músculo cardíaco realizada por Vater.

Apenas entrado el siglo XVIII, un anatomista consagrado y un estudiante de medicina llegaron a un mismo descubrimiento: un sistema de vasos cardiales mínimos, asociado, al parecer, con las coronarias y el lumen del corazón. En honor del más joven, cuyos resultados de la investigación hizo públicos en su disertación doctoral de Leiden, los "vasa cordis minima" se denominarían vasos de Thebesius. El autor famoso era Raymond Vieussens (1635-1715), conocido en toda Europa por su *Neurographia universalis*, un atlas de las estructuras nerviosas publicado en 1684. Vieussens era uno de los pocos médicos de ese período en Francia que ocupaba una posición hospitalaria. Durante su primera estancia de diez años en el hospital de san Eloy de Montpellier realizó unas 500 autopsias. Buscó una explicación química del metabolismo y la respiración. Atribuyó la diástole a la fermentación intravascular de la sangre.

Adam Christian Thebesius nació en Wohlau, en el seno de una familia en cuyo árbol genealógico abundaban teólogos y pastores luteranos. Tras su formación humanística en Breslau, se matriculó en la facultad de medicina. Al estudio de la medicina iba aparejada la *peregrinatio academica*, por diversos centros del país y del extranjero, con la frecuente disparidad de doctrinas que ello entrañaba y que explicaba cierto escepticismo compartidor. En tiempos de Thebesius las universidades holandesas, francesas y alemanas despuntaban por encima de las tradicionales Bolonia, Padua o Ferrara. Thebesius se matriculó en 1705 en la Universidad de Leipzig. Allí enseñaban entonces Johannes Bohn (anatomía), August Quirinus Rivinus (física, botánica, patología y terapéutica), Michael Ernst Ettmüller (fisiología y patología), Johann Christian Schamberg (cirugía y anatomía), Christian Ludwig Welsch y Johann Wilhelm Pauli (fisiología, anatomía y cirugía), cuya influencia, de muchos de ellos, trascendía la cátedra. Basta consultar algunas bibliotecas españolas de esos años para corroborarlo. Bohn, como recuerda Thebesius en sus *Observationes*, fue uno de los fundadores de la fisiología experimental y enemigo acérrimo de la quimiatría; en sus clases aprendió Thebesius la técnica de inyección que habría de servirle en la disertación de Leiden, en cuya universidad se matriculó en 1708. Coincidían en el claustro varios expertos en anatomía: Bernhard Albinus, fundador del teatro, Johann Jacob Rau, demostrador, y Govert Bidloo, autor de un divulgadísimo atlas. Junto a ellos, Friedrich Dekkers, docente de medicina práctica, y Hermann Boerhaave, el gran sistemático y maestro de la medicina europea.

Apenas un par de años antes, en 1706, Raymond Vieussens, mientras estudiaba un pólipo en el corazón, observó la presencia de vasos en la superficie interna del músculo. Supuso que eran los vasos de "almacenamiento y transporte" considerados por Descartes fermento de la contracción. En su *Traité Nouveau de la Structure et des Causes du Movement Naturel du Coeur*, publicado en 1715, ofrecería la primera descripción precisa del sinus coronarius y de las arterias coronarias.

Por su parte, Thebesius había iniciado en Leipzig los experimentos que respaldan su exposición de grado sobre la provisión venosa del corazón y la existencia de venae cordis minima descritas por él. Leyó la disertación, *De circulo sanguinis in corde*, el 15 de mayo de 1708. Ese trabajo constaba de 19 páginas; en él se realiza una delicada exposición anatómica de la red vascular y el órgano cardíaco. Al poco, cumplidos ya los 23 años, comienza a ejercer en Hirschberg, donde redactó las *Observationes* anatómicas, que envió a la Academia Leopoldo-Carolina Regia de Ciencias para su publicación en las "Ephemerides". Basadas en su praxis médica desde 1709, aparecieron en 1715. Merece particular mención la primera, sobre la aparición de pólipos. Por esa época escribió también un *Tractatus de succesorione morborum*.

Otro anatomista de una decorosa segunda fila en los decenios alboreales del siglo XVIII fue Vater. Nacido en Wittenberg, en cuya universidad su padre profesaba, se doctoró en medicina en 1710. Dedicó los dos años siguientes a la obligada *peregrinatio*. Visitó a Georg Ernst Stahl en Halle, a Georg Wolfgang Wedel en Jena, a Bernard Friedrich Weiss (Albinus) y Hermann Boerhaave en Leiden, a Ruysch en Amsterdam y a John Sloane en Londres. En enero de 1719 empezó su carrera docente en Wittenberg. Compaginó las clases con una discreta labor publicista sobre procesos, glándulas y cambios operados durante la preñez, iniciada

en 1720 con su *Dissertatio anatomica, qua novum bilis diverticulum circa orificium ductus cholidochi ut et valvulosam colli vesicae felleae constructionem ad disceptandum proponit, atque singularis utriusque structurae eximiam utilitatem in via bilis determinanda exponit*. Sabido es que arranca por entonces y cobrará fuerza a lo largo del siglo, en diversos centros de Europa, un poderoso movimiento de renovación de la anatomía que en Leiden, por ejemplo, giraba en torno a la figura del mencionado Albinus.

Las traducciones y sumarios cumplen una función destacada en la promoción de las ideas a lo largo del Siglo de las Luces. Esa labor ruda y obscura tiene en Paul Henri Dietrich (1723-1789), barón d'Holbach, un digno representante. Mucho menos valiosas se nos antojan sus creaciones propias en el campo de la filosofía de la ciencia (*D'Holbach e le Rivoluzioni del Globo*). Nació en Edesheim, cerca de Landau, y se nacionalizó francés en 1749. Para la *Enciclopedia* de Diderot, con quien comenzó a colaborar desde 1751, tradujo 376 artículos alemanes, en su mayoría de temas químicos y metalúrgicos. Desde el punto de ideación personal, merecen reseñarse *Système de la nature* (1770) y *Système social* (1773), ambos con más pretensiones que coherencia lógica.

Holbach percibió desde muy pronto la importancia de la traducción para el desarrollo industrial de su país de adopción. Presentó incluso un listado de obras imprescindibles. El mismo había roturado buena parte del suelo. En 1752 vertió el *Art de la verrerie* de Antonio Neri, Christopher Merret y Johan Kunckel. Le siguieron la *Minéralogie* (1753) de Johan Gottschalk Wallerius, la *Introduction à la minéralogie* (1756) de Johann Friedrich Henckel, la *Chimie métallurgique* (1758) de Christlieb Ehregott Gellert, los *Traités de physique, d'histoire naturelle, de minéralogie et de métallurgie* (1759) de Johann Gottlob Lehmann, la *Pyritologie* (1760) de Henckel y las *Oeuvres métallurgiques* (1760) de Johann Christian Orschall.



3. Raymond Vieussens (1635-1713).

La labor de traducción imponía la acuñación de los términos y poner orden en una disciplina, la química mineral, cuya obscuridad empezaba por la propia asociación directa y unívoca entre vocablo y concepto. En el artículo "Cornaline" de la Enciclopedia (1754), Louis Daubenton reconoce la importancia del trabajo de reordenación de la nomenclatura mineralógica llevado a cabo por Holbach. No se había limitado a una eficaz sinopsis de la terminología griega, latina, alemana y francesa, eliminando las equivalencias engañosas y las falsas sinonimias. Creó neologismos que suplían las carencias del léxico mineralógico francés.

En ese dominio se le reconoce incluso cierta originalidad. Escribió la voz "Minéralogie", del tomo X de la *Encyclopédie*. Se trata, dice, de la parte de la historia natural que se ocupa del "conocimiento de las sustancias del reino mineral, es decir, de las tierras, piedras, sales, sustancias inflamables, petrificaciones, en una palabra, cuerpos inanimados y no provistos de órganos sensibles que se encuentran en el seno de la tierra y en su superficie". Para Holbach las operaciones de los químicos podían ofrecer indicaciones preciosas sobre las modalidades de producción natural de los minerales. La estructura, cristalina o irregular, de las rocas debíase al grado de homogeneidad o heterogeneidad de las partículas en solución y a la duración de los procesos de consolidación. Las rocas cristalinas, las más antiguas, aparecerían tras la disipación del caos originario; las otras, dispuestas en estratos horizontales, y que a veces presentaban las *huellas* de plantas y conchas, constituían las piedras más recientes, parecidas a las que se siguen formando todavía.

En el marco de la voz "Terre", llama revolución al conjunto de fenómenos geológicos en razón de los cuales el planeta se ha alterado en todo (revolución general) o en parte (revolución local). Con las revoluciones generales, se trata de fenómenos absolutamente decisivos en el cuadro de la historia de la Tierra, que modifican el relieve, el clima y la geografía entera. En las revoluciones locales operan episodios catastróficos (terremotos o inundaciones) y episodios de procesos lentos y graduales (erosión pluvial o la acción de transporte del limo efectuada por los ríos).

En el siglo del afianzamiento del descubrimiento de la sexualidad vegetal y de la taxonomía de las plantas, con su identificación binomial, la botánica aparece con luz propia (*French Botany in the Enlightenment* y *Antonio José Cavanilles*). Roger L. Williams completa una trilogía dedicada a la botanofilia que prendió entre el público ilustrado del

siglo XVIII francés, si bien el fenómeno tuvo un alcance paneuropeo. La curiosidad por la flora exótica se extendió a los paisajes, animales, grupos humanos y artefactos culturales.

Siguiendo la estela española, aunque Williams no lo menciona, los viajes ultramarinos franceses comenzaron en el siglo XVII. En su mayoría, quienes se ocuparon de la historia natural pertenecían a las órdenes religiosas, que integraban la búsqueda de remedios vegetales en su tarea misionera. La publicación de los *Genera plantarum* de Linneo, en 1737, donde exponía un ingenioso sistema sexual de clasificación, representó un punto de inflexión. Más o menos desde ese momento los científicos seculares tomaron el relevo de los frailes. Arquetipo pionero del nuevo naturalista lo tenemos en Michel Adanson, quien partió para el Senegal en 1748, enrolado en la Compagnie des Indes. Compaginó su labor de funcionario con la herborización. Transcurridos seis años desembarcó con miles de especímenes botánicos y zoológicos, ornados de apuntamientos sobre la geografía de Senegal y las costumbres de la población local. Tal era la riqueza y diversidad vegetal observada, que volvió convencido de que ningún sistema podría abarcarlas en su clasificación. Pese a lo cual, desarrolló su propio sistema natural, en exceso farragoso para resultar viable y operativo, en *Familles des plants*, publicado en dos partes en 1763 y 1764.



4. Adam Christian Thebesius (1686-1732).

Para el progreso de la ciencia, de la botánica aquí, era imprescindible la creación de una estructura que diera continuidad a los graduales avances, que regulara la herborización, que clasificara los pliegos y permitiera su consulta e intercambio, junto con un jardín de experimentación y aclimatación. De los muchos predios consagrados a ese menester el *Jardin du Roi* no tuvo par. Y la labor allí desarrollada es inimaginable sin Louis-Guillaume Lemonnier. Competente botánico de la escuela de Bernard de Jussieu, con un poder omnímodo que le otorgaba el ser médico real con Luis XV y luego Luis XVI, en sus manos estuvieron las subvenciones a las exploraciones. Animó la creación del Petit Trianon, uno de los primeros jardines experimentales (las plantas se sembraron de acuerdo con unos criterios taxonómicos); puso a su maestro al frente. Tras dejar a René Desfontaines la dirección del *Jardin du Roi,* Lemonnier estableció un *hortus* privado en Versailles, donde aclimataba árboles exóticos a partir de semillas recibidas de diversas partes del mundo y con la esperanza de propagarlos por la campiña y floresta de Francia. Poseía un herbario personal de 10.000 especímenes.

Sabida es la injusticia de la historia con el científico que no publica. Con Philibert Commerson se ha mostrado particularmente cruel. Cualquiera que se halle familiarizado con los libros de botánica desde la segunda mitad del siglo XVIII conoce la influencia determinante de ese expedicionario infortunado, hoy desvanecido su recuerdo. Estudió medicina en Montpellier, donde residió desde 1747 hasta 1755. Allí, siguiendo una inveterada costumbre herborizadora que remontaba a la Edad Media, comenzó a formar su propio herbario. En 1755 pasó a Suiza para visitar a Albrecht von Haller, y descender luego a su Borgoña natal. Su fama precoz llegó a oídos de Linneo y Bernard de Jussieu.

Se trasladó a París en 1764. Con una buena experiencia de campo se convirtió en el botánico idóneo para ocupar plaza en la expedición científica hacia el hemisferio meridional bajo el mando de Louis-Antoine de Bougainville. La expedición levó anclas en 1766. Tenía Commerson entonces 39 años. Se trazó un programa minucioso de trabajo, convertido en modelo de viajes ulteriores. Cruzaron el Atlántico y atravesaron el estrecho de


5. Corazón con sinus coronarius.

Magallanes rumbo a Tahití. Las colecciones tahitianas se perdieron o cayeron en otras manos. Tras 21 meses de navegación, Bougainville alcanzó las islas Mauricio, la base central del trabajo del naturalista. Pese a su delicado estado de salud, Commerson recibió la orden de explorar también Madagascar. En ésta encontró un paraíso botánico. Un mundo por nombrar y clasificar. A comienzos de 1771 herborizó en la isla de Reunión. Le mandó plantas y semillas a Lemonnier, con una carta donde le rogaba que velase por su derecho de prioridad ante el aprovechamiento de los zánganos. Commerson murió en Mauricio en 1773. El año siguiente llegaban a Francia 32 cajas con los manuscritos y colecciones de Commerson, que se depositaron en *el Jardin du Roi*. El monarca confió el legado a Antoine-Laurent de Jussieu, quien supo explotar su valía en la redacción de su famoso *Genera plantarum* (1789). Entre los 37 nuevos géneros del propio Commerson allí recogidos se cuenta el muy extendido hoy *Bougainvillea*.



6. Retrato de Jean François de Galaup de La Pérouse.

El mismo año de 1773 en que moría Commerson, René-Louiche Desfontaines llegaba a París en busca de un grado en medicina. Siguió las clases del anatomista Félix Vicq d'Azyr, que no le atrajeron; en cambio se mostró alumno aventajado de Antoine-Laurent de Jussieu. Protegido por Lemmonier, exploró entre 1783 y 1785 la costa occidental de Africa del Norte, objeto central de su *Flora atlantica, Agro tunetano et algeriensi crescunt*, publicada en 1798-1799 en dos volúmenes. La obra aportaba descripciones de 1520 especies, 300 de las cuales, más seis géneros, eran nuevas para la ciencia, junto con 261 láminas.

No le acompañó la fortuna a Jean-François La Pérouse, quien partió de Brest en 1785 y naufragaría en 1788. En su búsqueda se organizó en 1791 otra expedición, dirigida por Antoine-Raymond Entrecasteaux. A ésta le siguió un tercer intento. En las instrucciones de a bordo sobre el fin de la misión se detallaba cuidadosamente que se procurase determinar el número de vértebras lumbares en los varones de los países explorados, que parecía variar. Por lo que se refería a la botánica, debía prestarse particular atención a las plantas de interés industrial y médico. Otras cuestiones anatómicas y fisiológicas: tamaño de la cabeza del varón y de la mujer, longitud de sus extremidades, color de la piel, deformaciones inducidas en el cuerpo por los aborígenes; vigor de los varones; edad de la pubertad; número de hijos; presión arterial. No podían faltar las recomendaciones sobre la forma de recoger, embalar y mantener las condiciones de los especímenes en las bodegas.

Ese ambiente de París es el que respira Antonio José Cavanilles Palop, nacido en Valencia en 1745, en cuya universidad inició su formación filosófica, que culminó con el doctorado en teología por la Universidad de Gandía en 1766. Conoció las corrientes epistemológicas de su tiempo y se adentró en el terreno de la matemática, a través del *Compendio Mathematico* del padre Tomás Vicente Tosca. Fracasó en oposiciones a cátedra en el estudio general valentino y hubo de ganarse el pan con un empleo habitual en su tiempo: preceptor de los hijos de un notable influyente, en su caso el vástago de Teodomiro Caro de Briones, oidor de la Audiencia valenciana. Recaló en la corte, donde perteneció al círculo valenciano (Francisco Pérez Bayer, Vicente Blasco y Juan Bautista Muñoz) estudiado de una forma exhaustiva por los historiadores levantinos.

Tras un año y medio de docencia de filosofía en el colegio murciano de san Fulgencio, torna a Madrid en 1776 como capellán privado del duque del Infantado y preceptor de sus hijos. La familia, con su fámulo, residen ya en París desde el verano de 1777. Aprovecha la intensa actividad científica de la ciudad para asistir a clases de química y, sobre todo, botánica. López Piñero subraya en la monografía de cabecera la importancia de los *Apuntamientos lógicos*, escritos en 1780, para interpretar su posterior obra sistemática. Esta empieza realmente con la publicación de las *Monadelphia Classis Dissertationes*, elaboradas en su asidua asistencia al *Jardin du Roi* y la conversación constante con Antoine-L. Jussieu, Lamarck y, sobre todo, André Thouin, el capataz. Pero en París todo noble que se precie tiene su propio jardín, que será visitado por Cavanilles. Aprende a usar la lupa y el microscopio para afinar sus descripciones de unos órganos que tenían en la fibra la unidad estructural básica. Obligado a abandonar París el año de la Revolución, se instala en Madrid. Compagina la redacción de trabajos menores con la preparación de los *Icones*, cuyo último volumen, el sexto, salió de tiros en 1801. Incluyen la descripción de 712 especies, donde no faltan notables endemismos peninsulares.

—Luis Alonso





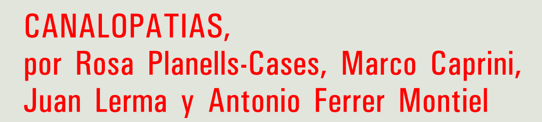
CALENTAMIENTO ANTROPOGENICO PREINDUSTRIAL, por William F. Ruddiman

Según una nueva y atrevida hipótesis, las actividades agrarias de nuestros antepasados iniciaron el calentamiento global miles de años antes de la revolución industrial.



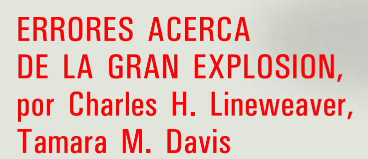
EQUIDOS SALVAJES EN PELIGRO, por Patricia D. Moehlman

Se sacrifica a cebras, asnos y caballos salvajes por su carne, por su piel o para obtener remedios medicinales. Esta depredación, unida a la desaparición de sus hábitats y a una reproducción que de suyo es lenta, amenaza su supervivencia.



CANALOPATIAS, por Rosa Planells-Cases, Marco Caprini, Juan Lerma y Antonio Ferrer Montiel

Los canales iónicos controlan la mayoría de nuestras actividades y funciones. No es de extrañar, por tanto, que su alteración provoque patologías muy diversas.



ERRORES ACERCA DE LA GRAN EXPLOSION, por Charles H. Lineweaver, Tamara M. Davis

¿Fue realmente lo que sugiere su nombre? ¿Hay galaxias que se alejen de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz? ¿Qué tamaño tiene el universo observable?



VENCER AL LUPUS, por Moncef Zouali

Aclarar las causas de esta enfermedad autoinmunitaria supone un problema de la mayor dificultad. El esfuerzo se recompensaría con tratamientos mejores y más específicos.